



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Evaluación probabilista del daño sísmico basado en índices de vulnerabilidad. Aplicación a las escuelas de la provincia de Girona.

Trabajo realizado por:

María del Rocío Romero Jarén

Dirigido por:

Dra. Nieves Lantada Zarzosa

Co-dirigido por:

Dr. Lluís G. Pujades Beneit

Máster en:

Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica

Barcelona, 22 de junio de 2016

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer el esfuerzo y la dedicación a mis tutores: el Dr. Lluís G. Pujades Beneit y la Dr. Nieves Lantada Zarzosa. En todo momento me han apoyado para seguir adelante, me han guiado en los momentos de duda y han dedicado mucho tiempo a asesorarme y corregir con detalle la memoria.

Quiero agradecer especialmente a mis padres, Ramón y M^a José; a mi pareja, Martín; y a mi familia. A pesar de la distancia que nos ha separado durante los dos años de máster les he sentido siempre cerca y animándome para seguir a delante.

También quiero agradecer a mis amigos: Alex, Cintia, Jean, Manuel y Paula que han logrado que el máster sea una experiencia inolvidable y con los que he vivido momentos que no tendré que guardar en una memoria USB porque, para ellos, siempre hay sitio en mi corazón.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster consiste en una evaluación del daño sísmico de forma probabilista de edificios especiales situados en zonas urbanas. El método, que incorpora aspectos probabilistas novedosos, se basa en el método del índice de vulnerabilidad propuesto en marco del proyecto Risk-UE. Se aplica a doscientas noventa y cinco escuelas (un total de 775 edificios) de la provincia de *Girona* con tipologías distintas: mampostería, hormigón armado, acero, barracones y muros de hormigón armado prefabricados.

La peligrosidad sísmica del área de estudio se evalúa mediante tasas de excedencia de intensidades macrosísmicas y la vulnerabilidad sísmica de cada edificio mediante funciones probabilistas, que varían según el índice de vulnerabilidad. Los valores del daño sísmico resultantes se representan a través de índices de daño esperado. El daño en los edificios se estima con funciones que relacionan la peligrosidad sísmica de la zona y la vulnerabilidad del edificio, teniendo en cuenta incertidumbres.

Se emplea el código USERISK 2011 para estimar la vulnerabilidad de cada edificio. Y posteriormente, a partir de los datos que proporciona el programa, se estiman los índices de daño para los percentiles 5, 50 y 95, asociados a cada edificio.

Como resultados se obtienen mapas que representan escenarios de daño sísmico esperado para periodos de retorno de 100, 475 y 3333 años, con intensidades EMS'98 VI, VII y VIII respectivamente. Además, se obtienen los índices de vulnerabilidad para las distintas clases estructurales que tienen asociados los edificios de la base de datos del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Las clases estructurales más vulnerables son mampostería y muros prefabricados de hormigón armado. Por el contrario, las tipologías menos vulnerables son los barracones y los edificios de hormigón armado.

Para el escenario sísmico correspondiente a una intensidad VII (475 años de período de retorno) y percentil 50 existen un total de 29 escuelas que alcanzarían un estado de daño moderado y 1 alcanzaría un estado de daño severo tras la ocurrencia de un fenómeno sísmico.

El método aplicado permite estimar bien el daño sísmico de edificios situados en áreas urbanas con varios elementos expuestos. Combinado con un SIG permite la elaboración de mapas de escenarios de daño sísmico a diferentes escalas que, además, son de fácil actualización.

ABSTRACT

For this Master's Thesis a probabilistic assessment has been carried out of the seismic risk associated with special buildings in urban areas. The method, which incorporates novel probabilistic approaches, is based on vulnerability index method proposed in the framework of the Project Risk-UE. It is applied to two hundred and ninety five schools (with a total of 775 buildings) in the province of *Girona* with different structural typologies: masonry, reinforced concrete, steel, barracks and precast reinforced concrete walls.

The seismic hazard of the area of study is evaluated through exceedance rates for macroseismic intensities and the seismic vulnerability of each building is represented through probability functions which vary according to the vulnerability index. The resulting seismic risk values are represented through anticipated damage indexes. Damage to the buildings is estimated using functions, which establish the relation between the seismic hazard of the area and the vulnerability of the building, taking uncertainties into account.

Code USERISK 2011 is used to estimate the vulnerability of each building. Afterwards, with the data provided by the Code, the damage indexes for each building are estimated for percentiles 5, 50 and 95.

The results are reflected in maps that represent different seismic damage states for return periods of 100, 475 and 3333 years, with EMS'98 intensities VI, VII and VIII respectively. In addition, indexes of seismic vulnerability are estimated for different structural classes, associated with the buildings of the Geographic Information System (GIS) database.

The most vulnerable structural classes are masonry and precast reinforced concrete walls. On the contrary, the least vulnerable structural classes are the barracks and reinforced concrete buildings.

For the seismic scenario corresponding to an intensity VII (return period of 475 years) and the 50 percentile there is a total of 29 schools that would undergo moderate damage and one school would undergo severe damage after the occurrence of a seismic phenomenon.

The applied method allows us to make a fair estimation of the seismic damage of buildings in urban areas with various exposed elements. Combining this with GIS allows us to map scenarios of seismic damage with different scales which, moreover, are easy to update.

CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS	11
LISTADO DE TABLAS	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. OBJETIVOS	20
1.2. METODOLOGÍA	21
1.3. TAREAS DESARROLLADAS	22
1.4. RESULTADOS ESPERADOS	23
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	24
CAPITULO 2. EVALUACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO	27
2.1. METODOLOGÍA. PROGRAMA USERISK	27
2.1.1. PELIGROSIDAD SÍSMICA	27
2.1.2. VULNERABILIDAD SÍSMICA	28
2.1.3. DAÑO ESPERADO	35
2.1.4. DAÑO SÍSMICO	40
CAPITULO 3. APLICACIÓN A LAS ESCUELAS DE <i>GIRONA</i> (PROVINCIA)	43
3.1. GEOLOGÍA Y SISMICIDAD	44
3.2. DISTRIBUCIÓN ADMINISTRATIVA	45
3.3. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES	46
3.4. PELIGROSIDAD SÍSMICA	50
3.5. VULNERABILIDAD SÍSMICA Y DAÑO ESPERADO	52
3.5.1. CÓDIGOS IDENTIFICATIVOS	52
3.5.2. CÓDIGO DE LA TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL	53
3.5.3. FACTOR DE FIABILIDAD AL ESTIMAR LA TIPOLOGÍA	61
3.5.4. CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO	61
3.5.5. ZONA SÍSMICA	61
CAPITULO 4. RESULTADOS	63
4.1. RESULTADOS OBTENIDOS	63
4.1.1. APLICACIÓN A TIPOLOGÍAS ESTÁNDAR	63
4.1.2. APLICACIÓN A TIPOLOGÍAS NO ESTÁNDAR	70
4.1.3. APLICACIÓN A NIVEL COMARCAL	77
4.1.4. APLICACIÓN A NIVEL PROVINCIAL	91
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS	96

DAÑO ESPERADO EN LOS EDIFICIOS	101
DAÑO ESPERADO EN LAS ESCUELAS DE LA COMARCA DEL <i>ALT EMPORDÀ</i>	102
DAÑO ESPERADO EN LAS ESCUELAS DE LA COMARCA DEL <i>GIRONÈS</i>	102
DAÑO ESPERADO EN LAS ESCUELAS DE LA PROVINCIA DE <i>GIRONA</i>	103
CAPITULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
5.1. DISCUSIÓN	105
5.1.1. ENFOQUE PROBABILISTA.....	105
5.1.2. PROGRAMA USERISK	105
5.1.3. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	106
5.2. CONCLUSIONES	107
5.2.1. EL MÉTODO	107
5.2.2. CONCLUSIONES SOBRE LA VULNERABILIDAD	107
5.2.3. CONCLUSIONES SOBRE EL DAÑO SÍSMICO.....	108
5.3. RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	111
5.3.1. SOBRE EL MÉTODO Y EL PROGRAMA	111
5.3.2. SOBRE LOS DATOS Y LA INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	111
5.3.3. SOBRE LA VULNERABILIDAD Y EL DAÑO ESPERADO.....	112
REFERENCIAS	113
ANEXOS	117
ANEXO A.	117
A1. SUPERFICIE DE LAS COMARCAS Y MUNICIPIOS DE <i>GIRONA</i>	117
A2. DETALLES DE VULNERABILIDAD	117
A3. DETALLES DEL DAÑO ESPERADO	117

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la vulnerabilidad de las escuelas y peligrosidad de la provincia de Girona.....	23
Figura 2. Pasos a considerar para la obtención de índices de vulnerabilidad mediante USERISK.	28
Figura 3. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS'98. Fuente: Pujades y Barbat, 2004.....	35
Figura 4. Funciones de vulnerabilidad para un edificio de mampostería.	41
Figura 5. Mapa de la ubicación de la provincia de Girona (rojo) dentro del territorio de la Península Ibérica.	43
Figura 6. Mapa de la peligrosidad sísmica de Cataluña para un periodo de retorno de 500 años. La división administrativa del mapa es por comarcas (Secanell et al., 2004).	44
Figura 7. Mapa de la peligrosidad sísmica de Girona para un periodo de retorno de 500 años. La división administrativa que se muestra son los municipios.	45
Figura 8. Mapa de las comarcas de la provincia de Girona.....	46
Figura 9. Número de escuelas (%) por niveles educativos para la Provincia de Girona (Casado, 2012).	48
Figura 10. Número de edificios (%) por tipologías constructivas estándar (azul) y no estándar (naranja) para la Provincia de Girona (2016).....	49
Figura 11. Número de escuelas por comarca para la Provincia de Girona (2016).....	49
Figura 12. Curvas de peligrosidad de Barcelona (Secanell et al., 2004).	51
Figura 13. Curvas de peligrosidad de la provincia de Girona.	52
Figura 14. Curva semi-empíricas de vulnerabilidad de la tipología M 3.1B.....	54
Figura 15. Curvas semi-empíricas de vulnerabilidad de diferentes estructuras de mampostería (BTM).....	54
Figura 16. Aproximación funciones de vulnerabilidad tipologías de mampostería BTM y M 3.1B.	55
Figura 17. Matriz de probabilidad de daño de las tipologías no estándar.	57
Figura 18. Curvas semi-empíricas de vulnerabilidad ajustadas a partir de índices de daño medio calculados para las tipologías barracón y HAP.....	58
Figura 19. Aproximación funciones de vulnerabilidad tipologías BTM y Barracón.	59
Figura 20. Aproximación funciones de vulnerabilidad tipologías BTM y HAP.	59

Figura 21. Aproximación funciones de vulnerabilidad de 4 tipologías BTM y Barracón.	60
Figura 22. Aproximación funciones de vulnerabilidad de 4 tipologías BTM y HAP.....	60
Figura 23. Edificio de mampostería de la Escola Gonçal Comella – Zer La Garriga (Casado, 2012).	64
Figura 24. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de mampostería.....	64
Figura 25. Curvas de daño para un edificio de mampostería.....	65
Figura 26. Plano de la vista en planta del edificio de hormigón armado del instituto Montsacopa (Casado 2012).	66
Figura 27. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de hormigón armado.....	67
Figura 28. Curvas de daño para un edificio de hormigón armado.....	67
Figura 29. Edificio de acero de la Escola Annexa – Joan Puigbert (Casado, 2012). ...	68
Figura 30. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de acero.	69
Figura 31. Curvas de daño para un edificio de acero.	70
Figura 32. Barracón de la Escola Bora Gran – Zer les Goges (Street View Google, 2013).	71
Figura 33. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de tipo barracón.	71
Figura 34. Curvas de daño para un edificio de tipo barracón.	72
Figura 35. Edificio de muros prefabricados de hormigón armado de la Escola Salvador Espriu (Street View Google, 2012).	73
Figura 36. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.....	73
Figura 37. Curvas de daño para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.	74
Figura 38. Edificio de mampostería con forjado desconocido de la Escola Baldiri Reixac (Casado, 2012).	75
Figura 39. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.....	76
Figura 40. Curvas de daño para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.	76
Figura 41. Peligrosidad sísmica de la comarca del Alt Empordà.....	77
Figura 42. Escenario de daño para la comarca <i>Alt Empordà</i> para el percentil 95 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de <i>Figueres</i>	78

Figura 43. Escenario de daño para la comarca <i>Alt Empordà</i> para el percentil 50 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de <i>Figuera</i> s.....	79
Figura 44. Escenario de daño para la comarca <i>Alt Empordà</i> para el percentil 5 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de <i>Figuera</i> s.....	80
Figura 45. Escenario de daño para la comarca <i>Alt Empordà</i> para el percentil 95 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de <i>Figuera</i> s.	81
Figura 46. Escenario de daño para la comarca <i>Alt Empordà</i> para el percentil 50 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de <i>Figuera</i> s.	82
Figura 47. Escenario de daño para la comarca <i>Alt Empordà</i> para el percentil 5 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de <i>Figuera</i> s.	83
Figura 48. Peligrosidad sísmica de la comarca del Gironès.	84
Figura 49. Escenario de daño para la comarca del Gironès para el percentil 95 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de Girona.	85
Figura 50. Escenario de daño para la comarca del Gironès para el percentil 50 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de Girona.	86
Figura 51. Escenario de daño para la comarca del Gironès para el percentil 5 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de Girona.	87
Figura 52. Escenario de daño para la comarca del Gironès, para el percentil 95 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de Girona.	88
Figura 53. Escenario de daño para la comarca del Gironès, para el percentil 50 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de Girona.	89
Figura 54. Escenario de daño para la comarca del Gironès, para el percentil 5 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de Girona.	90
Figura 55. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 95 e intensidad VI.	91
Figura 56. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 95 e intensidad VII.	92
Figura 57. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 95 e intensidad VIII.....	92
Figura 58. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 50 e intensidad VI.	93
Figura 59. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 50 e intensidad VII.	93
Figura 60. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 50 e intensidad VIII.....	94

Figura 61. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 5 e intensidad VI.	94
Figura 62. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 50 e intensidad VII.	95
Figura 63. Escenario de daño para la provincia de <i>Girona</i> para el percentil 50 e intensidad VIII.	95
Figura 64. Número de edificios para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.	97
Figura 65. Número de edificios de mampostería para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.	98
Figura 66. Número de edificios de hormigón armado para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.	99
Figura 67. Número de edificios de acero para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.	99
Figura 68. Número de barracones para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.	100
Figura 69. Número de edificios de muros prefabricados de hormigón armado para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.	100
Figura 70. Número de edificios de mampostería con forjado desconocido para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.	101
Figura 71. Índices de daño medio para todas las escuelas de la provincia de Girona para una intensidad VII para el percentil 50 y la curva mejor de vulnerabilidad (período de retorno de 475 años).	104

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Elementos que componen el fichero de peligrosidad sísmica a introducir en USERISK.	27
Tabla 2. Matriz de tipologías estimada en el proyecto Risk-UE, BTM (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	29
Tabla 3. Modificadores regionales para Barcelona en función de la tipología y el período constructivo (Lantada, 2007).....	30
Tabla 4. Modificadores por comportamiento considerados en el programa USERISK (Lantada, 2007).	33
Tabla 5. Elementos que componen el fichero de información de los edificios para USERISK.	34
Tabla 6. Clasificación del daño según EMS-98 para edificios de mampostería (EMS-98, 1998).	36
Tabla 7. Clasificación del daño según EMS-98 para edificios de hormigón armado (EMS-98, 1998).	37
Tabla 8. Intensidades I – VI consideradas por la EMS'98 (EMS-98, 1998).	38
Tabla 9. Intensidades VII – XII consideradas por la EMS'98 (EMS-98, 1998).	39
Tabla 10. Niveles de educación de la LOMCE. *Para estos niveles no hay límites de edad.	47
Tabla 11. Valores de las tres curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al., 2004).	50
Tabla 12. Valores de las tres curvas de peligrosidad sísmica de la provincia de Girona.	51
Tabla 13. Estimaciones del factor de daño Le, Be, He considerados para las tipologías FC 21 y FC 23 (ATC-13, 1985).....	56
Tabla 14. Niveles de daño considerados por ATC – 13 y Risk-UE (MIV).	56
Tabla 15. Correlación de los estados de daño entre ATC – 13 y Risk –UE.	57
Tabla 16. Descripción de los suelos para Barcelona (Cid et al., 2001).....	62
Tabla 17. Clasificación de las litologías de Girona.	62
Tabla 18. Índices de vulnerabilidad para un edificio de mampostería.....	64
Tabla 19. Índices de daño medio para un edificio de mampostería.....	65
Tabla 20. Índices de vulnerabilidad para un edificio de hormigón armado.....	66
Tabla 21. Índices de daño medio para un edificio de hormigón armado.....	68
Tabla 22. Índices de vulnerabilidad para un edificio de acero.	69

Tabla 23. Índices de daño medio para un edificio de acero.	69
Tabla 24. Índices de vulnerabilidad para un edificio de tipo barracón.	71
Tabla 25. Índices de daño medio para un edificio de tipo barracón.	72
Tabla 26. Índices de vulnerabilidad para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.....	74
Tabla 27. Índices de daño medio para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.	74
Tabla 28. Índices de vulnerabilidad para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.....	75
Tabla 29. Índices de daño medio para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.	77
Tabla 30. Escuelas de la comarca del <i>Alt Empordà</i> con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.	108
Tabla 31. Escuelas de la comarca del <i>Baix Empordà</i> con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.	109
Tabla 32. Escuela de la Garrotxa con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.....	109
Tabla 33. Escuela del Gironès con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.....	109
Tabla 34. Escuela de Pla d'Estany con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.....	109
Tabla 35. Escuela del Ripollès con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.....	110
Tabla 36. Escuela de la Selva con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.....	110

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Sismología es la rama de la geofísica que se encarga del estudio de terremotos y la propagación de las ondas producidas por los mismos en el interior de la Tierra. De este modo se estudian los procesos dinámicos de la Tierra y su estructura interna. Dicha ciencia puede dividirse en tres disciplinas: sismología en su sentido estricto, ingeniería sísmica y exploración sísmica (Udías, 1999).

Los movimientos sísmicos que se generan en las distintas partes del mundo pueden ocasionar daños en las estructuras de las ciudades, en la población y en el medio ambiente. A veces, estos daños son leves o incluso despreciables, pero en muchas situaciones generan lesiones permanentes, colapso de estructuras e incluso la muerte de seres vivos (Utsu, 2002).

La ingeniería sísmica es una ciencia aplicada que estudia la influencia que tienen los movimientos producidos por terremotos sobre edificios y otras estructuras antrópicas. Uno de los objetivos principales de esta ciencia es diseñar estructuras para que sean capaces de resistir los sismos. Para conocer si es necesario proyectar y construir estructuras sismorresistentes es necesario llevar a cabo estudios de peligrosidad sísmica de las distintas partes de la Tierra.

La peligrosidad sísmica mide la probabilidad que existe de superar el valor de un parámetro que mida el movimiento del suelo (intensidad, aceleración, desplazamiento, etc.) en un determinado periodo de tiempo (periodo de retorno). Determinar la peligrosidad sísmica de un lugar de la Tierra permite conocer y comprender el comportamiento de la tectónica de dicha zona. Se puede caracterizar a partir del valor máximo de aceleración o *Peak Ground Acceleration* (PGA), intensidad macrosísmica, intensidad de arias y aceleración espectral, entre otros parámetros. La evaluación de la misma se lleva a cabo mediante el análisis de la sismicidad ocurrida (catálogos), características sismotectónicas de la zona de estudio (zonas sismogénicas), leyes de recurrencia, leyes de atenuación, efectos locales y otros datos como acelerogramas. El estudio de la peligrosidad sísmica se puede llevar a cabo de manera determinista o probabilista:

- El método determinista se basa en terremotos específicos concretos. Para ello se aplican leyes de atenuación en las que se incluye la influencia de un único terremoto para cada zona considerada (por ejemplo, el máximo o el medio de un catálogo) y una distancia epicentral o hipocentral. Es muy importante definir adecuadamente el área de estudio y no es tan sencillo seleccionar el terremoto representativo. Como resultado de este método se obtiene el movimiento del suelo a causa de uno o más terremotos de referencia. La representación del movimiento es mediante espectros de respuesta para las localizaciones de estudio por separado (ciudades). Dichos espectros pueden compararse posteriormente con los espectros de diseño previstos en la norma sismorresistente correspondiente.
- Mediante el método probabilista se generan mapas con información sobre la peligrosidad sísmica de una región. El método de cálculo implica la aplicación de leyes de atenuación. Pero en este caso las contribuciones al movimiento del suelo quedan determinadas por todas las magnitudes y distancias significativas para el lugar de interés. Como resultado se obtienen los mapas de peligrosidad sísmica, curvas de tasas de excedencia en función de la intensidad de la peligrosidad sísmica (gals), espectro de peligrosidad sísmica y resultados de estudios de desagregación.

La vulnerabilidad sísmica es la cuantificación del daño o grado de daño que se espera sufra una determinada estructura o grupo de estructuras, sometidas a la acción dinámica de un suelo por un sismo de una determinada intensidad. La vulnerabilidad es un parámetro característico de cada estructura y viene determinada por distintas variables como: la demografía del lugar de estudio, la edad y resiliencia de ciudades (Jaramillo et al., 2016), la economía regional y global, la localización de la estructura (tipo de suelo) y el nivel tecnológico de la misma. La vulnerabilidad se entiende como la suma de dos vulnerabilidades: intrínseca y extrínseca. La intrínseca depende únicamente de las propiedades de la estructura de estudio mientras la extrínseca depende de su interacción con el entorno.

El objetivo principal de los estudios de peligrosidad sísmica, junto con el análisis de vulnerabilidad los elementos expuestos (edificios, infraestructuras, etc.), es conocer el daño sísmico de una zona de estudio. Como consecuencia, se determinan medidas de

prevención y planes de emergencia ante un fenómeno natural que, como se ha mencionado anteriormente, puede tener efectos devastadores sobre los seres vivos.

Por otro lado, el daño sísmico es la probabilidad de que las consecuencias sociales o económicas producidas por un terremoto igualen o excedan valores predeterminados para el área geográfica de estudio (UNDRO, 1979).

Para determinar escenarios de daño sísmico en zonas urbanas se pueden emplear distintas metodologías que han surgido en las últimas décadas. En la última década del siglo XX y la primera del siglo XXI, se desarrollaron varios proyectos relacionados con el daño sísmico orientados al cálculo de los parámetros explicados anteriormente (Moroux et al., 2004).

Este trabajo centra su estudio en la provincia de Girona, Cataluña. Se considera que la actividad sísmica en el área geográfica de Cataluña es moderada, existen registros históricos y estudios realizados que confirman la ocurrencia de fenómenos sísmicos de intensidades considerables (SISMICAT, 2003).

La provincia de *Girona*, al igual que otras provincias de Cataluña, ha experimentado un crecimiento de la población en las últimas décadas. Este crecimiento, además de la evolución natural de la población autóctona, se debe también a la inmigración desde otros países y desde otras Comunidades Autónomas. Por ello, se considera importante realizar un estudio de las escuelas de educación primaria y secundaria de la provincia de *Girona*.

A la hora de llevar a cabo estudios de daño sísmico es necesario disponer de datos correspondientes a las zonas urbanas que se desean someter al análisis. Dicha información puede almacenarse en extensas bases de datos. Es necesario emplear herramientas que faciliten la gestión, análisis y representación de información geográfica proveniente de distintas fuentes. Para ello, es útil el empleo de plataformas informáticas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Según la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE – 02) son edificaciones especiales aquellas que interrumpirían un servicio imprescindible para la colectividad o produciría efectos catastróficos en caso de ser destruidas ante la acción de un terremoto (BOE, 2002). Algunas de las construcciones que se consideran especiales son: hospitales, edificios para centros de organización, edificios para personal y equipos de ayuda o grandes construcciones de ingeniería civil como centrales nucleares

o presas. A pesar que las escuelas no están consideradas construcciones de importancia especial es cierto que además de que contienen durante muchas horas al día el futuro de nuestras sociedades, en caso de emergencia, se emplean también como asilo para la población que ha sufrido daños en sus viviendas.

Las principales motivaciones del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) son: 1) conocer y aplicar una metodología de última generación de análisis del daño sísmico; 2) conocer el daño sísmico de las escuelas de la provincia de Girona; 3) validar la viabilidad del método y complementar estudios realizados con anterioridad (Casado, 2012) y 4) proporcionar conclusiones y recomendaciones sobre el método y sobre el daño sísmico esperado en las escuelas.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) es la obtención de un escenario de daño sísmico probabilista con respecto a los edificios de las escuelas de educación primaria y secundaria de la provincia de *Girona*.

Otros objetivos específicos del TFM son:

1. Actualizar y completar la base de datos existente sobre las escuelas de educación primaria y secundaria de la provincia de *Girona* (Casado, 2012) y adaptarla para este estudio probabilista.
2. Aplicar el programa USERISK para edificios estándar del proyecto Risk-UE, pero en un área distinta de aquella para la cual fue elaborado (ciudad de Barcelona).
3. Aplicar el programa USERISK considerando tipologías estructurales no estándar del proyecto Risk-UE.
4. Aportar al método del índice de vulnerabilidad probabilista (LM1_P) mejoras y adaptaciones para analizar el daño sísmico de los edificios de las escuelas de *Girona*.
5. Comparar los resultados obtenidos mediante el programa USERISK y el código propio, mencionado anteriormente, para las tipologías no estándar de Risk-UE.
6. Proponer conclusiones, recomendaciones y elementos de mejora de los métodos y técnicas desarrolladas y aplicadas, así como de los resultados obtenidos.

1.2. METODOLOGÍA

En el presente estudio se aplica una de las metodologías propuestas en el proyecto Risk-UE (Unión Europea) desarrollado entre 2001 y 2004 (Mouroux et al., 2004).

Este proyecto propone dos metodologías para estimar escenarios de riesgo en núcleos urbanos de la Unión Europea. La primera de ellas, nivel I o LM1, denominada Método del Índice de Vulnerabilidad, MIV, (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), es un modelo uniparamétrico y define el peligro sísmico mediante grados de intensidades de la escala macrosísmica EMS'98 y la vulnerabilidad a través del índice de vulnerabilidad total. Este índice toma valores cercanos al 0 si la estructura tiene asociada una vulnerabilidad baja y cercanos al 1 para estructuras de alta vulnerabilidad. En determinados casos el índice de vulnerabilidad podría ser inferior a cero o superior a la unidad. La segunda metodología se basa en un modelo multiparamétrico, nivel 2 o LM2, y considera espectros de respuesta (para la acción sísmica) y espectros de capacidad (para la capacidad) cuyo cruce permite la determinación del punto de desempeño de la estructura de estudio. El punto de desempeño muestra el desplazamiento máximo de respuesta de la estructura ante la demanda (aceleración) del terremoto típico de la zona de estudio (Pujades y Barbat, 2004).

En concreto, para el desarrollo del presente TFM, se aplica una metodología que surge como una modificación del MIV. Aguilar (2011) presentó en su tesis doctoral una metodología, LM1_P, que permite considerar un enfoque probabilista en la determinación del daño sísmico. Las variaciones con respecto a MIV son: la posibilidad de considerar la peligrosidad sísmica del lugar de manera probabilista en un doble sentido, la peligrosidad se define de forma probabilista (curvas de frecuencia anual de excedencia de intensidad macrosísmica) y, además se consideran las incertidumbres en las tasas de excedencia. Por otra parte, la estimación de la vulnerabilidad se efectúa mediante distribuciones de probabilidad de un índice de vulnerabilidad. Así las estimaciones del daño consideran incertidumbres en la determinación de la tipología estructural y de la peligrosidad sísmica de la zona de estudio. En el apartado de metodología se desarrolla más en detalle el análisis mediante el método LM1_P.

1.3. TAREAS DESARROLLADAS

A continuación, se enumeran las tareas que se han desarrollado para completar el presente TFM:

1. Comprobación de la información, especialmente la tipología estructural asociada a los edificios que componen la base de datos que se ha empleado como fuente principal.
2. Actualización de la base de datos de Casado (2012), que se ha basado en: modificación de las tipologías estructurales asociada a algunas construcciones (se ha modificada con el paso del tiempo), corrección de la ubicación de escuelas que han cambiado su localización dentro del mismo municipio e inclusión de nuevos edificios que se han construido para algunas escuelas.
3. Estimación de la peligrosidad sísmica de la provincia de *Girona* de acuerdo a unos valores de intensidad (Secanell et al., 2008).
4. Zonificación por tipos de suelo en *Girona* según la descripción de los tipos de suelo que considera la NCSE-02 y atendiendo a las litologías existentes en la provincia y la edad de las mismas.
5. Elaboración de un código que permite considerar, mediante la estimación de un índice de vulnerabilidad óptimo y asociación a una tipología estándar de Risk-UE, tipologías no estándar de dicho proyecto.
6. Elaboración de un código que permite la estimación del daño sísmico de las escuelas de la provincia de *Girona* para edificios de tipologías no estándar del proyecto Risk-UE.
7. Cálculo del daño sísmico de las escuelas de la provincia de *Girona* para edificios de tipologías estándar y no estándar del proyecto Risk-UE a través del programa USERISK.
8. Cálculo del índice de daño más probable de cada edificio para los percentiles 95%, 50% y 5%.
9. Elaboración de escenarios de daño sísmico, a través de mapas en una plataforma SIG, a nivel provincial, comarcal y municipal.

1.4. RESULTADOS ESPERADOS

La peligrosidad sísmica de la provincia de *Girona* para un periodo de retorno de 475 años se caracteriza con intensidades de entre VI - VII y VIII (EMS'98). A pesar de tratarse de una peligrosidad entre moderada y alta (Secanell, 2008), el daño esperado en las escuelas de la provincia es relativamente alto. Este fenómeno puede deberse a la vulnerabilidad de los edificios que componen las escuelas. En la Figura 1 se muestran, sobre un mapa de la provincia de Girona, la vulnerabilidad mediante el índice $V_{I,BTM}^*$ de la matriz BTM de tipologías de Risk-UE (Tabla 2) y la peligrosidad mediante valores de intensidad EMS'98 (Secanell et al., 2004).

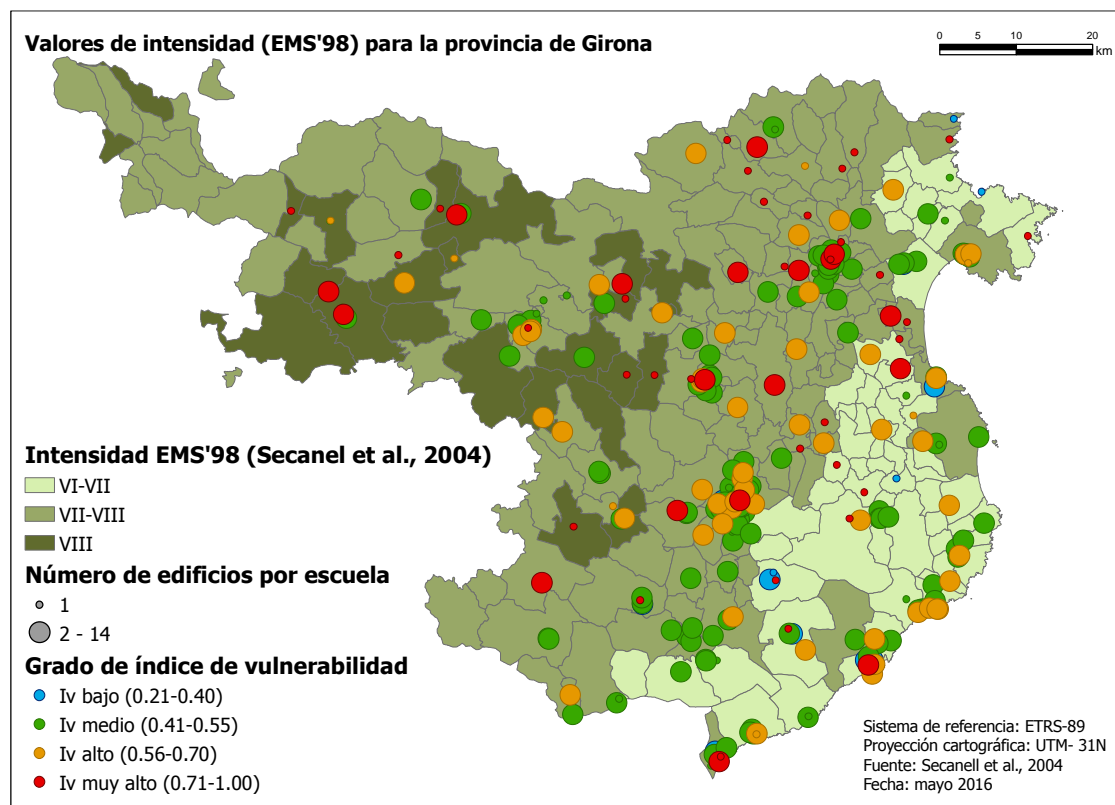


Figura 1. Mapa de la vulnerabilidad de las escuelas y peligrosidad de la provincia de Girona.

El estudio realizado pretende en primer lugar, elaborar una metodología de trabajo que permita estimar escenarios de daño sísmico, bajo un enfoque probabilista, para tipologías estructurales estándar y no estándar del proyecto Risk-UE.

En segundo lugar, se espera que los resultados de daño sísmico y vulnerabilidad permitan identificar las escuelas críticas de la provincia en su totalidad y por comarcas.

Para así favorecer la planificación de emergencias ante la ocurrencia de una catástrofe sísmica. De este modo, sería posible responder de forma rápida y eficaz y, en consecuencia, minimizar los daños en las personas y las edificaciones.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria del TFM está compuesta por cinco capítulos y un anexo. El presente capítulo es una introducción del trabajo realizado en el que se expone el marco conceptual del TFM, los objetivos que se persiguen alcanzar con la realización del mismo, el método aplicado, las tareas que se han desarrollado para lograr los objetivos planteados, los resultados que se esperan obtener y el alcance del estudio realizado.

En el segundo Capítulo, se desarrolla la metodología seguida para la estimación de escenarios de daño sísmico mediante la aplicación del programa USERISK. Se describe con detalle cómo el programa considera la peligrosidad del lugar de estudio, el cálculo de la vulnerabilidad de los edificios de estudio y el daño. Además, se explica cómo la Escala Macrosísmica Europea (EMS'98) considera el daño pues el método se basa en dicha escala. Y por último, se detalla la expresión empleada para la obtención del índice de daño medio para cada intensidad e índice de vulnerabilidad.

En el Capítulo 3 se expone la información sobre la geología, la sismicidad, la distribución administrativa de la zona de estudio y las diferentes tipologías estructurales que se asocian a los edificios de las escuelas de *Girona*. Además, se explica el procedimiento seguido para la obtención de la información que requiere el programa para generar escenarios de daño sísmico en la zona de estudio. Por un lado, a partir de los datos de peligrosidad sísmica de Barcelona y con la información de los valores de intensidad de la provincia de *Girona*, se establecen las curvas de peligrosidad de esta última. Por otro lado, se explica el procedimiento seguido para la determinación del índice de vulnerabilidad óptimo para tipologías estándar y no estándar del proyecto Risk-UE.

El Capítulo 4 se emplea para presentar y comentar los resultados que se han obtenido. Inicialmente se muestran los resultados, en forma de gráficas y tablas, para las tipologías estándar por un lado y las no estándar por otro. Además, se muestran los resultados en forma de mapas a nivel comarcal (*Alt Empordà y Gironès*) y provincial. Por último, se discuten los resultados obtenidos.

En el Capítulo 5 se muestran las principales conclusiones a las que se han llegado. Se incluyen conclusiones con respecto a los resultados obtenidos tras la realización del estudio y el análisis de los mismos y también, sobre la metodología aplicada, sus ventajas e inconvenientes. Por último, se incluyen futuras líneas de investigación que ayudarían a complementar y enriquecer un poco más el estudio realizado hasta el momento.

En el Anexo A se incluye once tablas. La Tabla 37 recoge los valores de la superficie de cada comarca. La Tabla 38 muestra el valor del área de cada municipio. La Tabla 39 incluye los valores considerados para el cálculo del índice de vulnerabilidad medio de cada clase estructural. En la Tabla 40 se muestra el número de edificios, por clases estructurales, para un determinado índice de vulnerabilidad. Por último, se incluyen 7 tablas con el valor del índice de daño medio esperado para todas las escuelas de *Girona* según el escenario de intensidad VII para un período de retorno de 475 años y el percentil 50.

CAPITULO 2. EVALUACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO

2.1. METODOLOGÍA. PROGRAMA USERISK

El código de cómputo USERISK (*Urban Seismic Risk*) fue desarrollado por Armando Aguilar en 2011. A través de este programa es posible estimar el daño sísmico según la metodología de Índice de Vulnerabilidad o de nivel I de Risk-UE de manera probabilista. Es un programa creado para poder ser empleado para el análisis de edificios en cualquier zona urbana.

2.1.1. PELIGROSIDAD SÍSMICA

La peligrosidad sísmica se introduce en forma de curva de peligrosidad sísmica expresada en términos de frecuencia anual de excedencia en función de intensidades EMS'98. Dicha curva expresa la peligrosidad de forma probabilista, por lo tanto, se da una curva media de la peligrosidad (C_m), una curva media menos una desviación estándar ($C_m - \sigma$) y una curva media más una desviación estándar ($C_m + \sigma$), supuesto que la tasa de excedencia se distribuye normalmente. Para su obtención puede emplearse, por ejemplo, el programa CRISIS2007 o versiones posteriores (Ordaz et al., 2007).

La información se introduce en el programa mediante un fichero de texto con extensión ".hz" (Tabla 1).

Tabla 1. Elementos que componen el fichero de peligrosidad sísmica a introducir en USERISK.

Fila del fichero	Descripción
1	Número de puntos que definen la curva $C_m - \sigma$.
2	Intensidades de cada punto que definen la curva $C_m - \sigma$.
3	Frecuencias anuales de excedencia de cada punto que definen la curva $C_m - \sigma$.
4	Número de puntos que definen la curva C_m .
5	Intensidades de cada punto que definen la curva C_m .
6	Frecuencias anuales de excedencia de cada punto que definen la curva C_m .
7	Número de puntos que definen la curva $C_m + \sigma$.
8	Intensidades de cada punto que definen la curva $C_m + \sigma$.
9	Frecuencias anuales de excedencia de cada punto que definen la curva $C_m + \sigma$.

2.1.2. VULNERABILIDAD SÍSMICA

Para obtener los valores de vulnerabilidad es necesario aplicar los cuatro pasos que se enumeran en la Figura 2. La información que se debe estimar en el primer punto es tarea del usuario. El resto de apartados se refieren al proceso interno del programa, pero para poder completar el segundo punto, es necesario introducir información varia con respecto a las características del edificio de estudio.

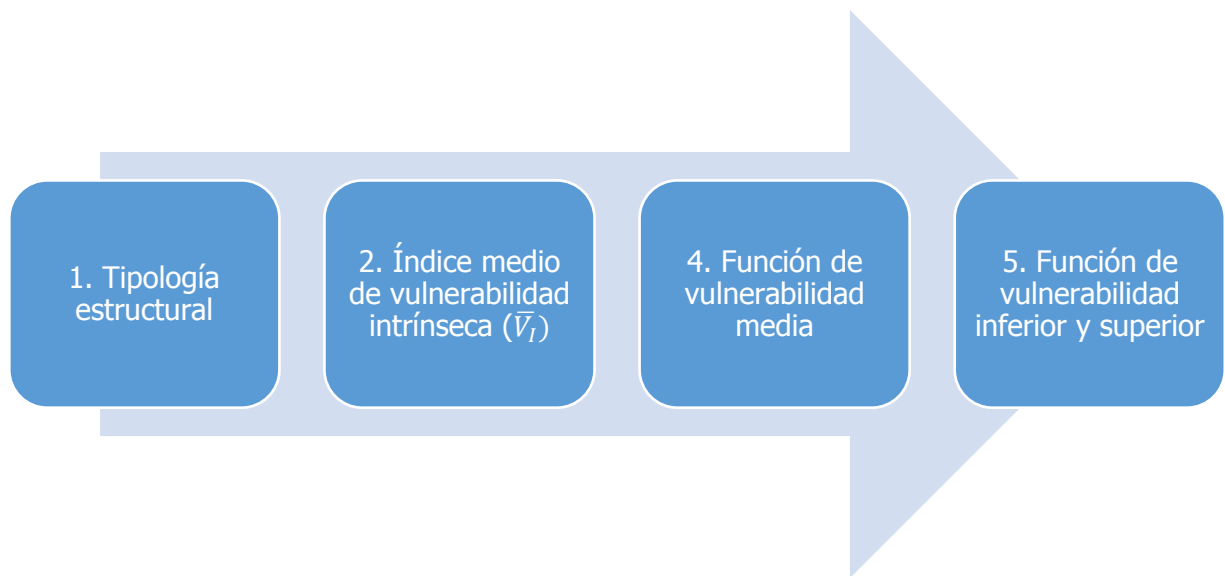


Figura 2. Pasos a considerar para la obtención de índices de vulnerabilidad mediante USERISK.

Paso 1. Tipología estructural.

Inicialmente, en función de las características de la estructura se debe asignar una tipología estructural de las estimadas en RISK-UE (Tabla 2). Para la definición de la tipología se puede disponer de información proveniente de distintas fuentes y, por lo tanto, con niveles de confianza distintos. Por ello, se considera un factor de confianza. El factor es función de diversos parámetros como, por ejemplo, la edad de la estructura o, si la clasificación tipológica se ha basado en el empleo de planos, de fotografías o realizando visitas a los edificios. Dicho factor va de 0, para bajos niveles de confianza, a 10, para altos niveles de confianza y lo define el usuario.

Siendo $V_{I,BTM}^*$ el valor más probables del índice de vulnerabilidad básico. $V_{I,BTM}^-$ y $V_{I,BTM}^+$ definen el intervalo admisible y $V_{I,BTM}^{min}$ y $V_{I,BTM}^{max}$ se corresponden con los límites inferior y superior, respectivamente, del índice de vulnerabilidad.

Tabla 2. Matriz de tipologías estimada en el proyecto Risk-UE, BTM (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Tipología	Descripción	Índices de Vulnerabilidad Básicos				
		$V_{I,BTM}^{min}$	$V_{I,BTM}^-$	$V_{I,BTM}^*$	$V_{I,BTM}^+$	$V_{I,BTM}^{max}$
M1.1	Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
M1.2	Muros de carga con mampostería de piedra tallada	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M1.3	Muros de carga con mampostería de sillería	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M3.1	Mampostería no reforzada con forjados de madera	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
M3.2	Muros de carga con mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería (se diferencian por el período de construcción)	0.460	0.650	0.776	0.953	1.020
M3.4	Mampostería no reforzada con forjados de losas de hormigón	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
M4	Muros de carga de mampostería reforzada	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
RC1	Estructuras de hormigón resistentes al momento	-0.02	0.047	0.442	0.8	1.02
RC2	Muros de cortante de hormigón	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC3.2	Estructuras de hormigón irregulares con muros de relleno de mampostería no reforzada	0.060	0.127	0.522	0.880	1.020
RC4	Sistemas duales, muros y pórticos de hormigón armado	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC5	Sistema de pórticos, placas de forjado y plafones auto portantes de hormigón prefabricado	0.14	0.207	0.384	0.51	0.7
S1	Estructuras metálicas resistentes al momento	-0.020	0.467	0.363	0.640	0.860
S3	Estructuras metálicas con relleno de mampostería	0.140	0.330	0.484	0.640	0.860
S5	Sistemas mixtos, de metal y hormigón armado	-0.020	0.257	0.402	0.720	1.020

Paso 2. Índice medio de vulnerabilidad intrínseca.

El índice medio de vulnerabilidad intrínseca, \bar{V}_I , (Expresión 1) se obtiene modificando el valor del índice más probable ($V_{I,BTM}^*$), proporcionado en la Tabla 2, en función de la localización del edificio (modificador regional, F_R) y de las características del mismo que influyen en su comportamiento (modificadores de comportamiento, V_{m_j}).

$$\bar{V}_I = (F_R \cdot V_{I,BTM}^*) + \sum V_{m_j} \quad \text{Expresión 1}$$

El modificador regional permite considerar diferencias para una misma tipología constructiva en función de la zona en la que el edificio se ubique. Para estimar el valor del modificador se considera la aplicación de las diferentes normativas de construcción españolas. En la Tabla 3 se muestran los valores estimados por Lantada (2007) como modificadores regionales por tipologías para la ciudad de Barcelona.

Tabla 3. Modificadores regionales para Barcelona en función de la tipología y el período constructivo (Lantada, 2007).

Período	Período de construcción	Normativas Españolas	Obligación de aplicación de norma en Barcelona	Práctica constructiva con refuerzos laterales	Nivel de diseño	Edificios (%)	Índice de Vulnerabilidad (V_I)				
							M3.1	M3.2	M3.3	M3.4	RC3.2
I	<1940	-	-	Ausente	No	8.2	+0.198	+0.162	+0.234	-	-
II	1941-1962	-	-	Deficiente	No	7.8	+0.135	+0.099	+0.171	-	-
III	1963-1968	Recomendación MV-101 (1962)	No especificado	Deficiente	No	4.4	+0.073	+0.037	+0.109	+0.134	+0.228
IV	1969-1974	Normativa sísmica PGS-1 (1968)	Si	Aceptable	Bajo	7	+0.010	-0.026	+0.046	+0.009	+0.103
V	1975-1994	Normativa sísmica PDS (1974)	Si	Aceptable	Bajo	17	-0.052	-0.088	-0.016	-0.053	-0.022
VI	1995-1996	Normativa sísmica NCSE-94 (1995)	No	Aceptable	Bajo	2	-0.052	-0.088	-0.016	-0.053	-0.022

Se pueden aplicar modificadores por comportamiento del edificio en función de las características propias del mismo, pero también de la interacción que tendría con su entorno ante la presencia de un sismo. En la Tabla 4 se muestran los modificadores por comportamiento que considera USERISK.

En el caso de los modificadores por el número de plantas para las tipologías metálicas (S1, S3 y S5) se les aplica el modificador correspondiente a la tipología de hormigón armado. Y para los de madera (W) se les aplica el de las estructuras de mampostería (Lantada, 2007).

Toda la información correspondiente a los apartados primero y segundo se compila en un fichero de texto con extensión “.csv” (Tabla 5).

Paso 3. Función de vulnerabilidad media.

El programa USERISK representa la vulnerabilidad sísmica del edificio mediante tres funciones (media, inferior y superior) de densidad de probabilidades de tipo beta (Expresión 2), que representan la variación del índice de vulnerabilidad para distintas probabilidades de excedencia. Se emplea la función de tipo beta porque: es posible considerar distribuciones con disimetrías importantes, es una función que facilita la representación de variables con intervalos restringidos y porque en aplicaciones anteriores (McGuire, 2004 y ATC-13, 1985) se han obtenido resultados razonables con su aplicación.

$$f\left(\frac{\bar{V}_I - V_a}{V_b - V_a}; \alpha_m, \beta_m\right) = \frac{\Gamma(\alpha_m + \beta_m)}{\Gamma(\alpha_m) \cdot \Gamma(\beta_m)} \cdot \left(\frac{\bar{V}_I - V_a}{V_b - V_a}\right)^{\alpha_m - 1} \cdot \left(1 - \frac{\bar{V}_I - V_a}{V_b - V_a}\right)^{\beta_m - 1} \quad \text{Expresión 2}$$

$$V_a \leq \bar{V}_I \leq V_b$$

$$\alpha_m > 0, \beta_m > 0$$

Siendo α_m y β_m los parámetros de forma de la distribución, V_a y V_b los límites inferior y superior de la distribución y Γ es la función gamma. Las funciones tienen asociadas un valor medio, μ , (Expresión 3) y la desviación estándar del mismo, $\sigma_{\bar{V}_I}$, (Expresión 4).

$$\mu = \frac{\bar{V}_I - V_a}{V_b - V_a} = \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \beta_m} \quad \text{Expresión 3}$$

$$\sigma_{\overline{V_I}} = \sqrt{\frac{\alpha_m \cdot \beta_m}{(\alpha_m + \beta_m)^2(\alpha_m + \beta_m + 1)} \cdot (V_b - V_a)^2} \quad \text{Expresión 4}$$

Como se ha dicho anteriormente, la vulnerabilidad se representa mediante tres funciones. Para obtener la curva media es necesario imponer, por un lado, que el valor medio de la función se corresponde con el índice de vulnerabilidad medio ya modificado (Expresión 3) y, por otro, que los límites V_c y V_d de la función contengan el 90% de la muestra (Expresión 5).

$$0.9 = \int_{V_c}^{V_d} f(y)dy = B_{V_d}(\alpha_m, \beta_m) - B_{V_c}(\alpha_m, \beta_m) \quad \text{Expresión 5}$$

Siendo $B_{V_c}(\alpha_m, \beta_m)$ y $B_{V_d}(\alpha_m, \beta_m)$ las funciones de distribución acumulativa beta incompletas para los valores V_c y V_d .

Para determinar los valores V_c y V_d se pueden considerar dos casos (Aguilar, 2011):

- a) Todos los edificios de una misma tipología tienen asociados los mismos límites de la función (Expresiones 6 y 7).

$$V_c = V_{I,BTM}^{min} \quad \text{Expresión 6}$$

$$V_d = V_{I,BTM}^{max} \quad \text{Expresión 7}$$

- b) Los límites de la función (V_c y V_d) varían para cada edificio según su ubicación y las características propias (Expresiones 8 y 9).

$$V_c = V_{I,BTM}^{min} + F_R + \sum V_{m_j} \quad \text{Expresión 8}$$

$$V_d = V_{I,BTM}^{max} + F_R + \sum V_{m_j} \quad \text{Expresión 9}$$

Siendo F_R el modificador regional y $\sum V_{m_j}$ la suma de los modificadores de comportamiento.

Tabla 4. Modificadores por comportamiento considerados en el programa USERISK (Lantada, 2007).





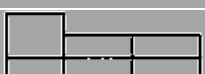
MODIFICADOR POR EL NÚMERO DE PLANTAS			
Tipología	Nº plantas	Modificadores M _h	
		Edificios de 1940 o anteriores	Edificios posteriores a 1940
Mampostería	Bajo (1 a 2)	-0.02	-0,04
	Medio (3 a 5)	+0.02	0
	Alto (6 o más)	+0.06	+0,04
Hormigón (Nivel de diseño bajo)	Bajo (1 a 3)	-0.04	
	Medio (4 a 7)	0	
	Alto (8 o más)	+0.08	
MODIFICADOR POR EL ESTADO DE CONSERVACIÓN			
Estado de conservación	Modificador M _{ec}		Código USERISK
Requieren grandes reparaciones	+0.04		D u O
Intermedios	0		R
No necesitan reformas	-0.04		N
MODIFICADOR POR IRREGULARIDADES EN PLANTA			
Parámetro RC	Modificador M _{ip}	$RC = \sqrt{\frac{\text{Área del edificio}}{\text{Área del círculo de mismo perímetro que el edificio}}}$	
RC < 0.5	+0,04		
0.5 ≥ RC < 0.7	+0,02		
MODIFICADOR POR DIFERENCIA DE ALTURA CON EDIFICIOS ADYACENTES			
Esquema	Modificador M _{hf}		Código USERISK
	0.00		0
	+0.02		1
	+0.04		2
	-0.04		3
	-0.02		4
MODIFICADOR POR LA POSICIÓN EN LA MANZANA			
Posición	Modificador M _{pf}		Código USERISK
Terminal	+0.06		3
Esquina	+0.04		1
Intermedio	-0.04		2

Tabla 5. Elementos que componen el fichero de información de los edificios para USERISK.

Fila del fichero	Descripción	Caracter
1	Número de orden del edificio dentro de la BBDD	Número entero
2	Código de identificación del edificio	Número entero
3	Código de la parcela del edificio	Número o letras
4	Código de la manzana del edificio	Número entero
5	Código de la zona censal ZRP del edificio	Número o letras
6	Código del barrio del edificio	Número o letras
7	Código del distrito del edificio	Número entero
8	Área del edificio en m ²	Número decimal
9	Perímetro del edificio en m	Número decimal
10	Número de niveles	Número entero
11	Código de la tipología BTM	Número y letras (sin puntos ni espacios)
12	Factor de fiabilidad al estimar la tipología	Número entero (0-10)
13	Año de construcción	Número entero
14	Zona sísmica	Número o letras
15	Código del estado de conservación (Tabla 4)	Letra
16	Código de la posición en la manzana (Tabla 4)	Número entero
17	Código por diferencia de altura con adyacentes (Tabla 4)	(Número entero)

Paso 4. Curva de vulnerabilidad inferior y superior.

Para definir la curva inferior y superior se lleva a cabo el mismo procedimiento explicado para estimar la curva media pero considerando unos valores medios del índice de vulnerabilidad tal y como se muestra en las Expresiones 10 y 11.

$$\bar{V}_{I L} = \bar{V}_I - \frac{10 - f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_{\bar{V}} \quad \text{Expresión 10}$$

$$\bar{V}_{I H} = \bar{V}_I + \frac{10 - f}{10} \cdot 1,96 \cdot \sigma_{\bar{V}} \quad \text{Expresión 11}$$

Siendo f el factor de confianza estimado en el paso 1 y $\sigma_{\bar{V}}$ la desviación estándar del valor medio de la función.

2.1.3. DAÑO ESPERADO

Escala de Intensidad Macrosísmica Europea, EMS'98.

La EMS'98 sirve como base para el análisis y la evaluación de la intensidad de fenómenos sísmicos en Europa (EMS-98, 1998). Se publicó en 1998 con el principal objetivo de revisar y actualizar la escala Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK-64). Clasifica el daño en cinco grados (Tabla 6 y 7) y considera doce intensidades.

En la descripción de cada una de las intensidades (Tabla 8 y 9) hay un apartado destinado a la cuantificación del daño que sufren los distintos tipos de edificios. Los términos de cantidad los define tal y como se muestran en la Figura 3. Dichos términos se pueden estimar dentro de un rango permitiendo una variabilidad de la cantidad asignada a la descripción.

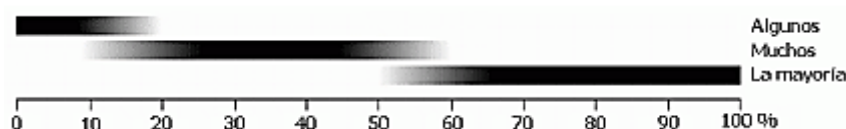


Figura 3. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS'98. Fuente: Pujades y Barbat, 2004.

Matriz de probabilidad de daño.

Las matrices de probabilidad de daño representan en su conjunto, y en función de la intensidad de la sacudida de los sismos producidos, el factor de daño (función de pérdidas económicas y valor de reposición), la razón de daño (función del número de edificios dañados y número total de edificios) y el factor de daño medio (función del número de edificios, coste económico y valor de reposición). Los elementos de la matriz se refieren a la probabilidad de que suceda un estado de daño para una determinada intensidad (Pujades y Barbat, 2004).

Para determinar la matriz de probabilidad de daño se distribuyen las probabilidades estimadas a partir de las descripciones de cada intensidad, y para el edificio de interés, según una distribución de tipo Beta equivalente (Expresión 12).

$$P_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q)\Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad a \leq x < b \quad \text{Expresión 12}$$

$$q = t(0,007\mu_D^3 - 0,052\mu_D^2 + 0,2875\mu_D) \quad \text{Expresión 13}$$

Siendo x el grado de daño considerado, t la dispersión de la distribución (8), Γ es la función gamma, a y b son los valores extremos de la función de densidad de probabilidades (0 y 6 respectivamente) y q es el parámetro de la distribución (Expresión 13) que se ajusta de forma que la distribución Beta sea equivalente a la Binomial.

Tabla 6. Clasificación del daño según EMS-98 para edificios de mampostería (EMS-98, 1998).

EJEMPLO	DESCRIPCIÓN
	Grado 1: sin daños a daños leves (sin daño estructural, daño no estructural leve). Grietas muy delgadas en muy pocos muros. Caída de pequeños pedazos de enlucido o enfoscado. Caída de rocas sueltas desde la parte alta de edificios en muy pocos casos.
	Grado 2: daños moderados (daño estructural leve, daño no estructural moderado). Grietas en muchos muros. Caída de pedazos grandes de guarnecido. Colapso parcial de chimeneas.
	Grado 3: daños sustanciales a severos (daño estructural moderado, daño no estructural severo). Grietas largas y extensas en casi todos los muros. Caída de tejas. Fractura de las chimeneas en la línea del techo; fallo de los elementos individuales no estructurales (particiones, frontones).
	Grado 4: daños muy severos (daño estructural severo, daño no estructural muy severo). Fallo serio de los muros; fallo estructural parcial de techos y pisos.
	Grado 5: destrucción (daño estructural muy severo). Colapso total o casi total.

Tabla 7. Clasificación del daño según EMS-98 para edificios de hormigón armado (EMS-98, 1998).




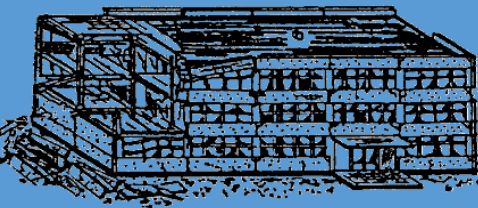

EJEMPLO	DESCRIPCIÓN
	<p>Grado 1: sin daños a daños leves (sin daño estructural, daño no estructural leve). Grietas delgadas en el guarnecido sobre elementos de la estructura o en la base de los muros. Grietas delgadas en particiones y tabiques.</p>
	<p>Grado 2: daños moderados (daño estructural leve, daño no estructural moderado). Grietas en columnas y vigas y en muros estructurales. Grietas en particiones y tabiques; caídas de revestimiento frágil y guarnecido. Caída de mortero en las uniones de paneles de muros.</p>
	<p>Grado 3: daños sustanciales a severos (daño estructural moderado, daño no estructural severo). Grietas en columnas y uniones entre columnas y vigas de la estructura en la base y en las uniones de muros acoplados. Desconchamiento del revestimiento de hormigón, torcedura de varillas de refuerzo. Grandes grietas en muros de particiones y en tabiques, fallo de tabiques individuales.</p>
	<p>Grado 4: daños muy severos (daño estructural severo, daño no estructural muy severo). Grandes grietas en elementos estructurales con fallo por compresión de hormigón y fractura de barras corrugadas; fallos en la junta de vigas reforzadas; inclinación de columnas. Colapso de algunas columnas o de un único piso superior.</p>
	<p>Grado 5: destrucción (daño estructural muy severo). Colapso de la planta baja o de partes de edificios (por ejemplo alas).</p>

Tabla 8. Intensidades I – VI consideradas por la EMS'98 (EMS-98, 1998).

GRADO DE INTENSIDAD	DESCRIPCIÓN
I. No se ha sentido	<ul style="list-style-type: none"> a) No sentido, aun en las condiciones más favorables. b) Sin efecto. c) Sin daños.
II. Apenas sentido	<ul style="list-style-type: none"> a) El temblor es sentido sólo en casos aislados (< 1%) por individuos en reposo y en una posición especialmente receptiva en el interior de un edificio o vivienda. b) Sin efecto. c) Sin daños.
III. Débil	<ul style="list-style-type: none"> a) El temblor es sentido en el interior de viviendas y edificios por algunas pocas personas. Las personas en reposo sienten un balanceo lento o temblor leve. b) Los objetos colgantes se mecen levemente. c) Sin daños.
IV. Observado ampliamente	<ul style="list-style-type: none"> a) El temblor es sentido por muchas personas en el interior y sólo por pocos en el exterior de viviendas o edificios. Algunas personas se despiertan. El nivel de vibración no es alarmante. La vibración es moderada. Los observadores sienten un leve temblor o balanceo del edificio, dormitorio, cama, silla, etc. b) La porcelana, vasos, ventanas y puertas traquetean. Los objetos colgantes se balancean. Los muebles ligeros vibran notablemente en algunos pocos casos. En algunos casos los objetos de carpintería crujen. c) Sin daños
V. Fuerte	<ul style="list-style-type: none"> a) El temblor es sentido por la mayoría en el interior y por pocos en el exterior de viviendas o edificios. Algunas pocas personas se asustan y corren al exterior. Muchas personas se despiertan. Los observadores sienten una fuerte vibración del edificio, dormitorio o de los muebles. b) Los objetos colgantes se mecen considerablemente. La porcelana y los vasos entrechocan y repiquetea. Los objetos pequeños que son más pesados en su parte alta o bien los objetos que se sostienen de forma precaria se pueden mover o caer. Las puertas y ventanas se abren o se cierran. En algunos pocos casos los cristales de las ventanas se pueden quebrar. Los líquidos oscilan y se pueden derramar de contenedores llenos hasta el borde. Los animales en el interior se pueden inquietar. c) Daño de grado 1 en algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad A y B.
VI. Daños leves	<ul style="list-style-type: none"> a) El temblor es sentido por la mayoría en el interior y por muchos en el exterior de viviendas o edificios. Algunas personas pierden el equilibrio. Muchas personas se asustan y corren al exterior. b) Los objetos pequeños de estabilidad normal pueden caerse y los muebles pueden desplazarse. En algunos casos se pueden romper platos y vasos. Los animales de granja se pueden asustar (incluso aquellos que se encuentran en el exterior). c) Daños de grado 1 en muchos edificios de clase de vulnerabilidad A y B; algunos pocos de clase A y B sufren daños de grado 2; algunos pocos de la clase C sufren daños de grado 1.

Tabla 9. Intensidades VII – XII consideradas por la EMS'98 (EMS-98, 1998).

GRADO DE INTENSIDAD	DESCRIPCIÓN
VII. Daños	<ul style="list-style-type: none"> a) La mayoría de las personas se asustan y tratan de correr hacia el exterior. A muchos les cuesta mantenerse de pie, especialmente en los pisos altos. b) Los muebles se desplazan y los muebles que son más pesados en su parte superior pueden volcarse. Se caen los objetos de los estantes en gran número. El agua salpica en los contenedores, tanques y piscinas. c) Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daño de grado 3 y algunos pocos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 2 y algunos pocos de grado 3. Algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 2. Algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daño de grado 1.
VIII. Daños severos	<ul style="list-style-type: none"> a) Mucha gente encuentra difícil mantenerse de pie, incluso en el exterior. b) Los muebles pueden volcarse. Se caen los objetos tales como televisores, máquinas de escribir, etc. Las lápidas pueden desplazarse o caerse. Se pueden ver ondas en suelos muy suaves. c) Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 4 y algunos pocos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 3 y algunos pocos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 2 y algunos pocos de grado 3. Algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 2.
IX. Destructivo	<ul style="list-style-type: none"> a) Pánico general. El terremoto tira a la gente al suelo. b) Muchos monumentos y columnas se caen o se retuercen. Se ven ondas en suelos suaves. c) Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 4 y algunos pocos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 3 y algunos pocos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 2 y algunos pocos de grado 3. Algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 2.
X. Muy destructivo	<ul style="list-style-type: none"> c) La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4 y algunos pocos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 3 y algunos pocos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 2 y algunos pocos de grado 3. Algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad F sufren daños de grado 2.
XI. Devastador	<ul style="list-style-type: none"> c) La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 5. La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4 y muchos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 4 y algunos pocos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 3 y algunos pocos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad F sufren daños de grado 2 y algunos pocos de grado 3.
XII. Totalmente devastador	<ul style="list-style-type: none"> d) Todos los edificios de clase de vulnerabilidad A, B y prácticamente todos los de clase C quedan destruidos. La mayoría de los edificios de las clases D, E y F quedan destruidos. Los efectos del terremoto alcanzan los efectos máximos concebibles.

Índice de daño medio.

El índice de daño medio o grado de daño más probable se determina según la Expresión 14 y es función del índice de vulnerabilidad medio (\bar{V}_I) y el grado de intensidad EMS'98 considerada (I).

$$\mu_D = 2,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6,25\bar{V}_I - 13,1}{2,3} \right) \right] \quad \text{Expresión 14}$$

2.1.4. DAÑO SÍSMICO

El daño sísmico se representa a través del índice de daño medio explicado anteriormente y partir del daño esperado puede calcularse el coste, normalmente en términos de coste de reposición o de reparación.

Para ello, se lleva a cabo el análisis de vulnerabilidad a través del programa USERISK para todos los edificios que componen la base de datos (774). De este análisis se obtienen tres curvas para cada edificio (inferior, mejor y superior) en las que se representa la probabilidad de excedencia para un determinado índice de vulnerabilidad.

El programa proporciona los parámetros de forma de la función. A partir de estos parámetros se obtienen las funciones en Matlab para un rango del índice de vulnerabilidad entre -1 y 2 y se calculan los índices de vulnerabilidad correspondientes a una probabilidad de excedencia del 95%, 50% y 5% para las tres curvas. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de curva de vulnerabilidad para un edificio de mampostería. Mediante círculos se indican los puntos de la curva para los cuales la probabilidad de excedencia es del 95%, 50% y 5%.

Se han considerado los percentiles 95, 50 y 5 ya que el proyecto ATC-13 considera los mismos rangos para obtener los valores de la probabilidad de daño. De este modo, los índices de vulnerabilidad para un 95% de probabilidad de excedencia y para un 5% contienen el 90% de la muestra y el valor óptimo se corresponde con el valor más probable (50% probabilidad de excedencia). En el siguiente capítulo se explica la relación del presente TFM con las estimaciones del daño según ATC-13 y en consecuencia el empleo de estos rangos.

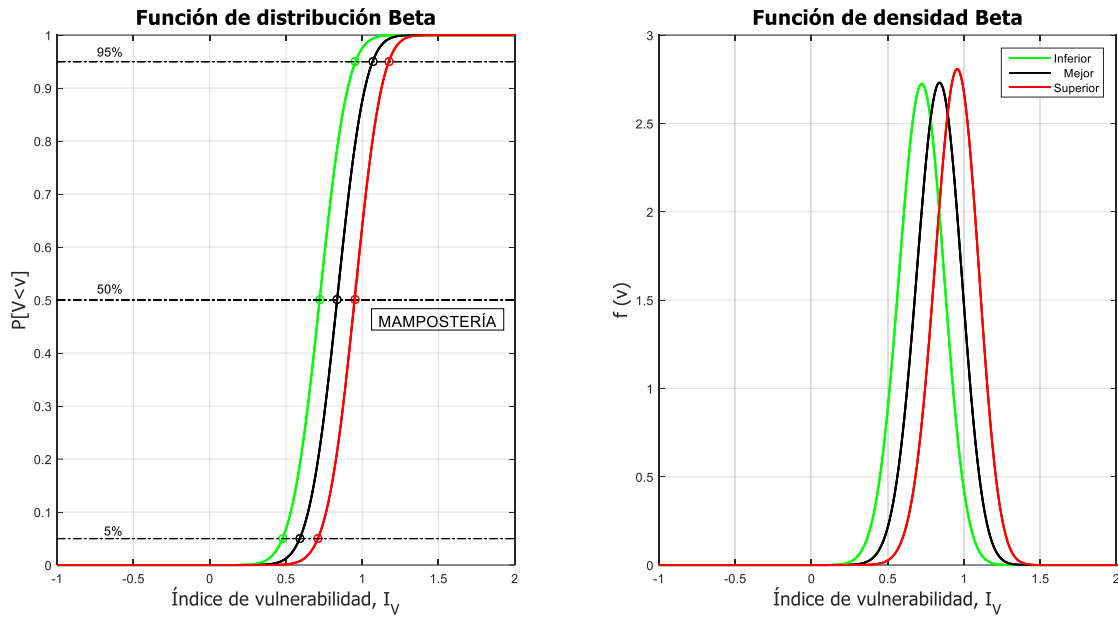


Figura 4. Funciones de vulnerabilidad para un edificio de mampostería.

Finalmente, a partir de estos valores del índice de vulnerabilidad, se calcula un valor del índice de daño medio para cada intensidad (Expresión 14). Para cada edificio y cada intensidad se obtienen nueve valores de este índice. El cálculo se lleva a cabo para intensidades desde VI hasta XII, aunque se analizan los resultados obtenidos para intensidades VI, VII y VIII pues son las que se dan en la provincia de *Girona*.

En el Capítulo 3 se muestran ejemplos de los resultados obtenidos.

CAPITULO 3. APLICACIÓN A LAS ESCUELAS DE *GIRONA* (PROVINCIA)

El estudio del daño sísmico se aplica a las escuelas de educación infantil, básica y secundaria postobligatoria (centros públicos, concertados y privados) de la provincia de *Girona*. En este capítulo se exponen, por un lado, las características principales de dicha provincia: geología, sismicidad, organización administrativa y tipologías estructurales que conforman la totalidad de las escuelas y, por otro lado, se desarrolla la metodología seguida para la aplicación del programa USERISK con la información disponible en la base de datos fuente.

La provincia de *Girona* se sitúa al nordeste de la Península Ibérica, pertenece a la Comunidad Autónoma de Cataluña y tiene una extensión de 5910 km² (Figura 5). Limita con las provincias de Barcelona y Lérida al suroeste y oeste respectivamente, con la República de Francia al norte y con el Mar Mediterráneo al este.



Figura 5. Mapa de la ubicación de la provincia de Girona (rojo) dentro del territorio de la Península Ibérica.

3.1. GEOLOGÍA Y SISMICIDAD

En Girona se pueden localizar dos unidades morfoestructurales principales:

- Los Pirineos orientales en la parte septentrional. Compuestos principalmente por pizarras y pliegues de margas y areniscas. Esta unidad desciende ramificándose hacia el sur y el este, hundiéndose en el mar en forma de cabos (Albera y Roses).
- La Cordillera Costero Catalana, también conocida como el Sistema Mediterráneo Catalán. Se trata de unas alineaciones de dos cadenas montañosas, Cordillera Litoral y Prelitoral, separadas por una fosa tectónica rellena por materiales terciarios y cuaternarios, la Depresión Prelitoral.

En un estudio publicado por Secanell y otros autores en 2004 se obtuvo un mapa de intensidades para la región de Cataluña considerando los efectos de suelo (Figura 6). A partir de los valores de intensidad estimados en el estudio mencionado y proporcionados por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) es posible representar la sismicidad de la región de estudio (Figura 7). Como puede observarse para la provincia de Girona se obtienen intensidades entre VI-VII (6.5) (valor mínimo de intensidad) y VIII (8) (valor máximo).

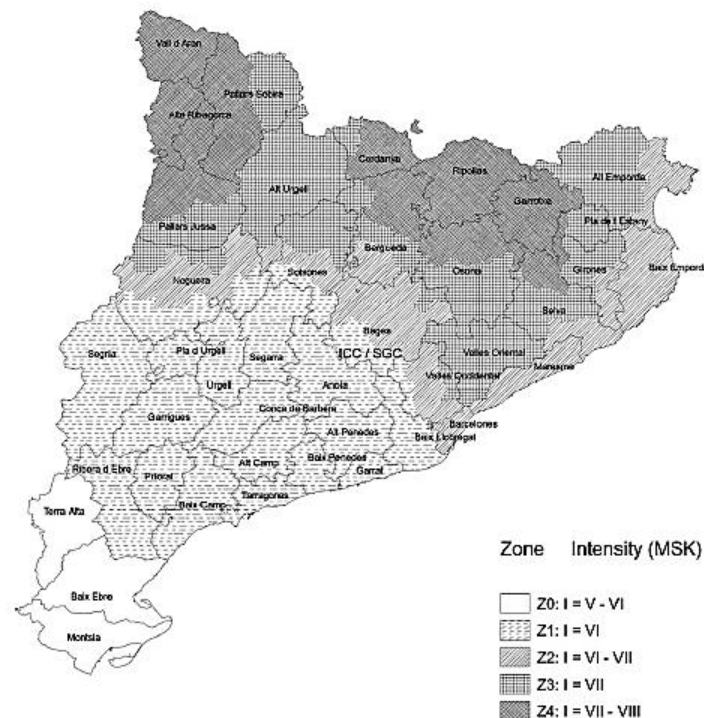


Figura 6. Mapa de la peligrosidad sísmica de Cataluña para un periodo de retorno de 500 años. La división administrativa del mapa es por comarcas (Secanell et al., 2004).

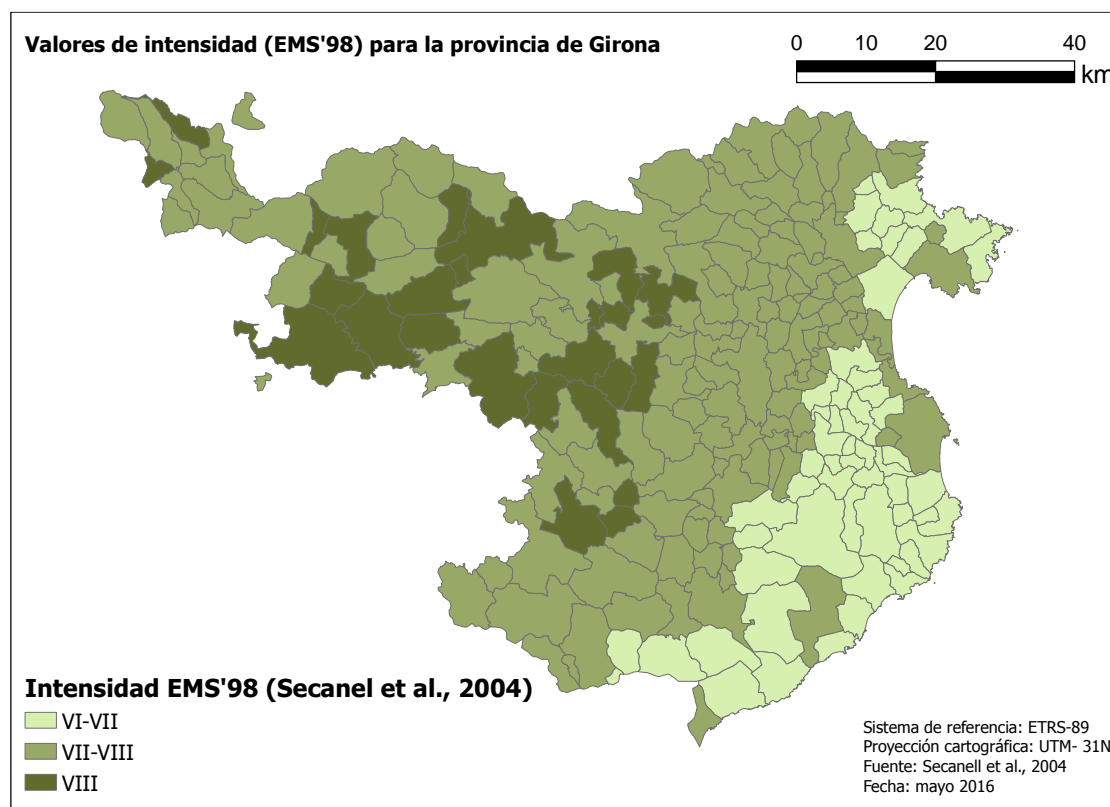


Figura 7. Mapa de la peligrosidad sísmica de Girona para un periodo de retorno de 500 años. La división administrativa que se muestra son los municipios.

3.2. DISTRIBUCIÓN ADMINISTRATIVA

La provincia de *Girona* se divide en ocho comarcas: *l'Alt Empordà*, *el Baix Empordà*, *la Cerdanya* (mitad oriental), *La Garrotxa*, *el Gironès*, *el Ripollès*, *el Plà de l'Estany* y *La Selva* (Figura 8). Existen algunos municipios que pertenecen a alguna de estas comarcas pero no a la provincia, como por ejemplo *Fogars de la Selva* (pertenecce a Barcelona). Por el contrario, hay municipios que pertenecen a la provincia de *Girona* pero a una comarca de Barcelona (*Osona*): *Espinelvas*, *Vidrà* y *Viladrau*.

En total, *Girona* está compuesto por 221 municipios. Por comarcas, el número de municipios, es: 68 en *l'Alt Empordà*, 36 en *Baix Empordà*, 11 en *La Cerdanya*, 21 en *La Garrotxa*, 27 en el *Gironès*, 3 en *Osona*, 11 en *Plà de l'Estany*, 19 en el *Ripollès* y 25 en *La Selva*.

En la Tabla 37 y Tabla 38 del Anexo A se muestran los valores del área de cada comarca y municipio en kilómetros cuadrados (respectivamente).

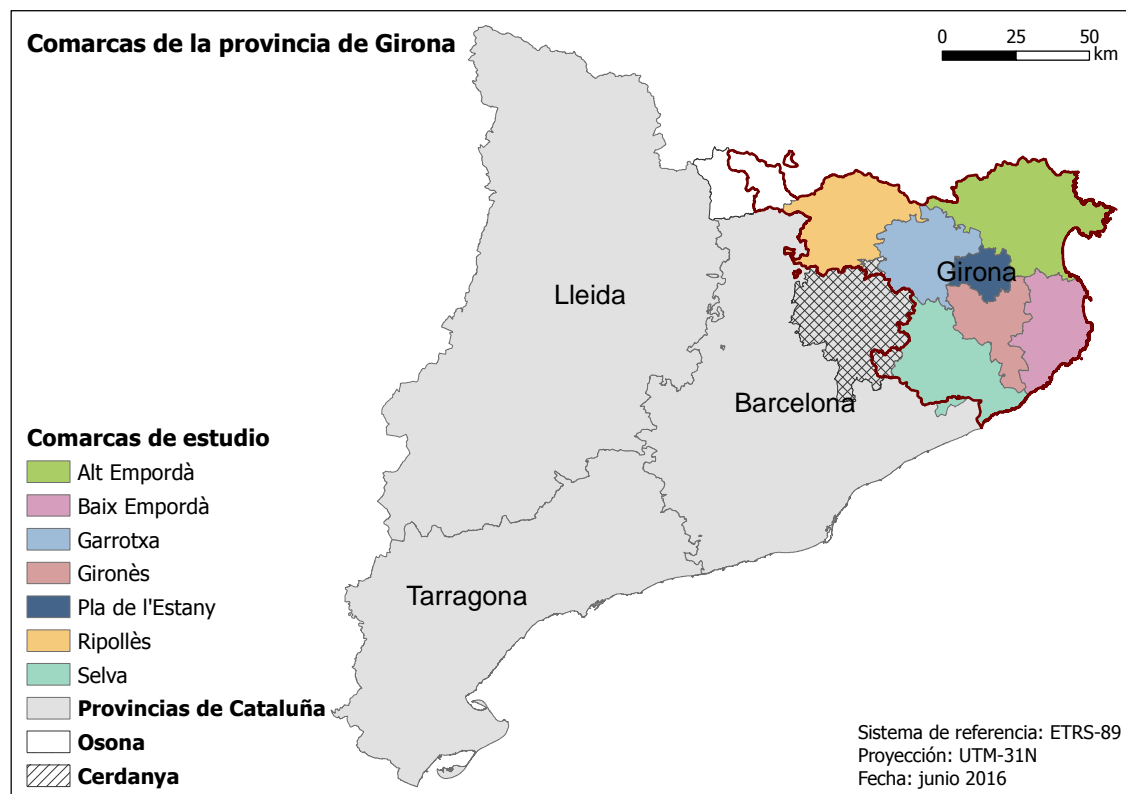


Figura 8. Mapa de las comarcas de la provincia de *Girona*.

3.3. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

El sistema educativo español (niveles no universitarios) se regula en base a la Ley Orgánica para la Mejora de la Calidad Educativa (LOMCE, 2013). Éste se divide en cinco niveles: educación infantil, educación básica, educación secundaria postobligatoria, educación superior y enseñanzas de régimen especial (Tabla 10).

En la provincia de Girona existen un total de 295 escuelas de educación infantil, primaria, secundaria obligatoria (ESO), bachillerato y ciclos formativos según la base de datos de Casado (2012). En la Figura 9 se muestran los porcentajes de escuelas clasificadas en función de los niveles educativos que incluyen.

Algunas de las escuelas están formadas por más de un edificio. La base de datos que se emplea para el análisis consta de 774 edificios. Se encuentran gran variedad de tipologías constructivas de la matriz BTM (Tabla 2), en concreto doce, a las que se denominan tipologías estándar. Por otro lado, se localizan edificios que no tienen asociadas

tipologías incluidas en la matriz BTM, se denominan tipologías no estándar. En la Figura 10 se muestra el número de edificios que componen la base de datos para cada tipología estándar (en azul) y no estándar (en naranja).

Tabla 10. Niveles de educación de la LOMCE. *Para estos niveles no hay límites de edad.

Categoría	Edad (años)	Carácter	Descripción
Educación infantil	0-5	No obligatorio	Educación infantil
Educación básica	6-12	Obligatorio	Educación primaria
	13-16		Educación secundaria (ESO)
Educación secundaria postobligatoria	*	No obligatorio	Bachillerato
			Formación profesional de grado medio
			Enseñanzas profesionales de artes plásticas y diseño de grado medio
			Enseñanzas deportivas de grado medio
Educación superior	*	No obligatorio	Enseñanza universitaria
			Enseñanzas artísticas superiores
			Formación profesional de grado superior
			Enseñanzas profesionales de artes plásticas y diseño de grado superior
			Enseñanzas deportivas de grado superior
Enseñanzas de régimen especial	*	No obligatorio	Idiomas
			Artísticas
			Deportivas

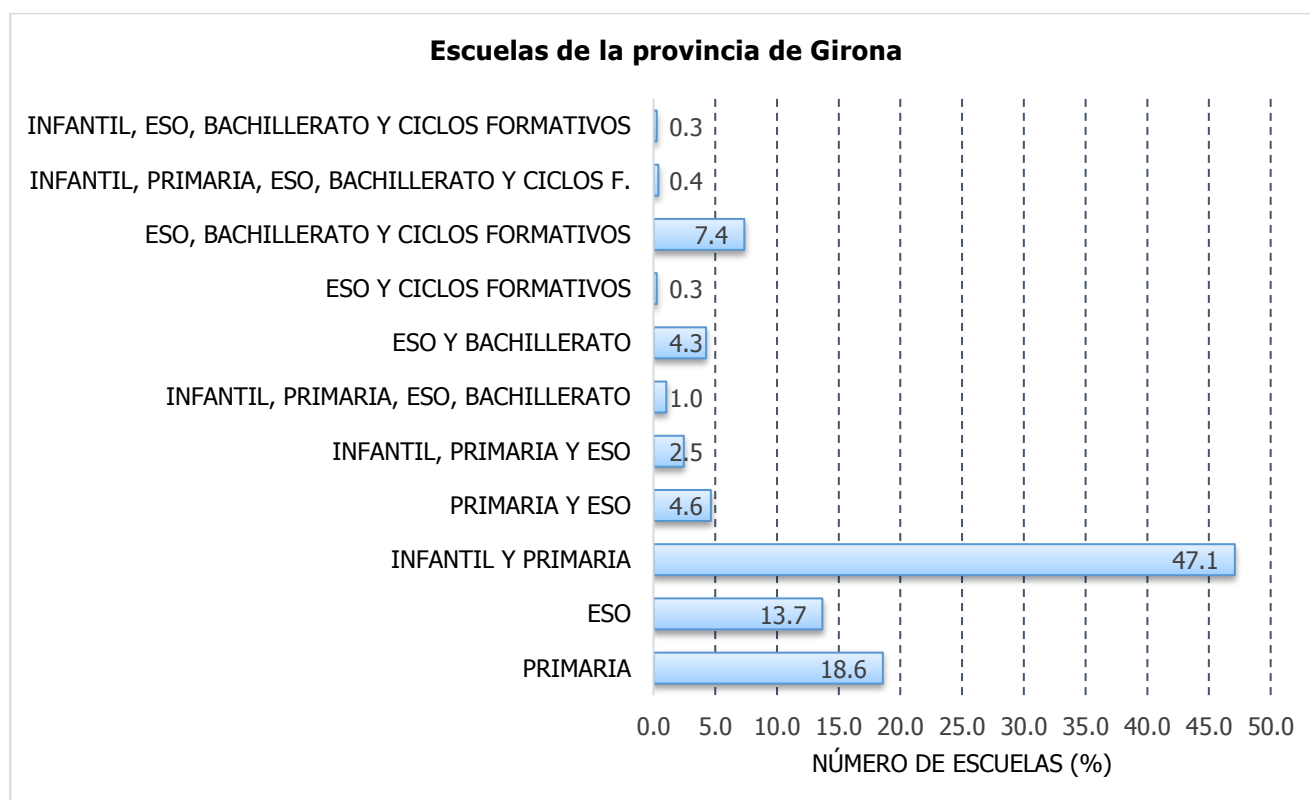


Figura 9. Número de escuelas (%) por niveles educativos para la Provincia de Girona (Casado, 2012).

Existen edificios construidos entre 1940 y 1960 de mampostería, pero de los cuales se desconoce el tipo de forjado. Éste podría estar compuesto por bóvedas de mampostería (tipología BTM M 3.2) o por un forjado mixto, de acero y mampostería (tipología BTM M 3.3). Se asigna un nuevo nombre para la tipología no estándar de estos edificios, M 3.1B.

Otra de las tipologías no estándar es el barracón. Se trata de estructuras metálicas prefabricadas. Su cimentación está compuesta por una base hormigón de limpieza, más unas zapatas aisladas de hormigón armado. Posteriormente, a dichas cimentaciones, se realizan bancadas y machones de bloques de hormigón delimitando el perímetro del módulo que se colocará. El área delimitada por estos muretes es rellena, mediante una sub-base compacta y grava, sobre ésta se realiza un pavimento de hormigón armado. Las paredes laterales del barracón, están formadas por paneles sándwich, compuestos de chapa nervada de acero galvanizada, por ambas caras (Casado, 2012).

Por último, algunos edificios están construidos con muros prefabricados de hormigón armado. A esta tipología se le denomina H.A. prefabricado (HAP).

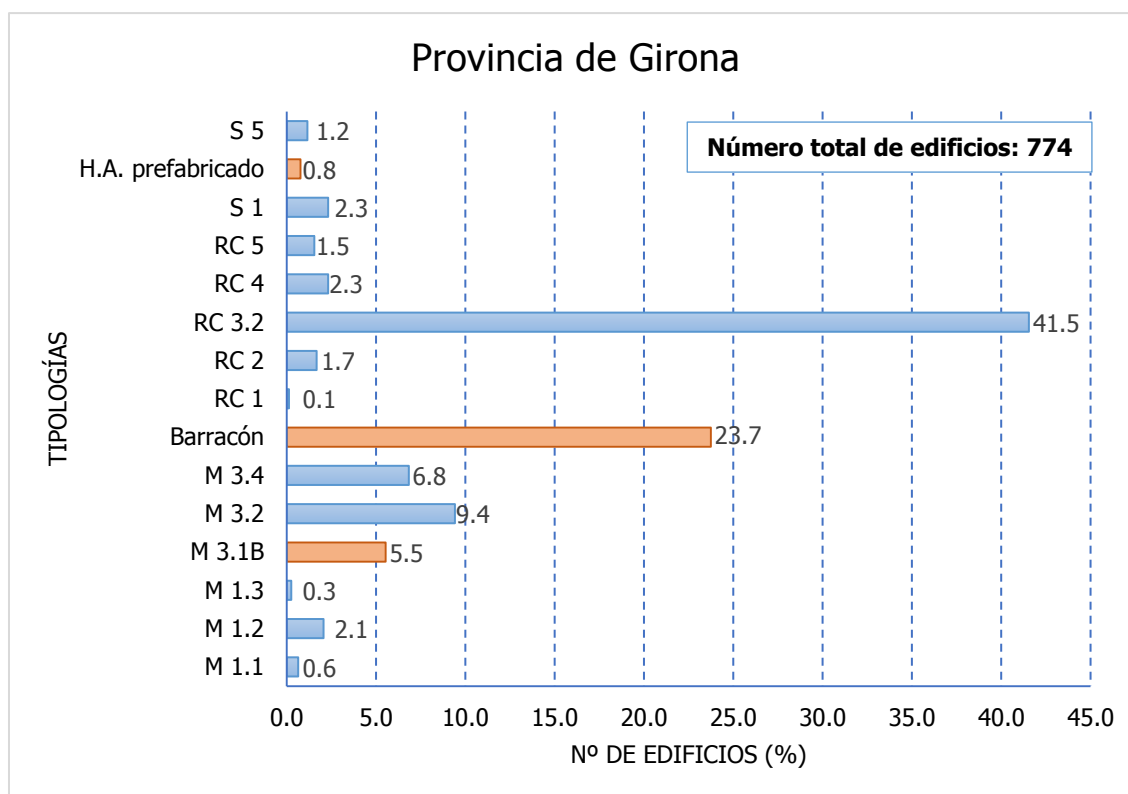


Figura 10. Número de edificios (%) por tipologías constructivas estándar (azul) y no estándar (naranja) para la Provincia de Girona (2016).

En la Figura 11 se muestran el número de escuelas por comarcas. Debido a que la comarca *Alt Empordà* es la que tiene más escuelas en el apartado de resultados se muestra un escenario de daño sísmico sólo para dicha comarca.

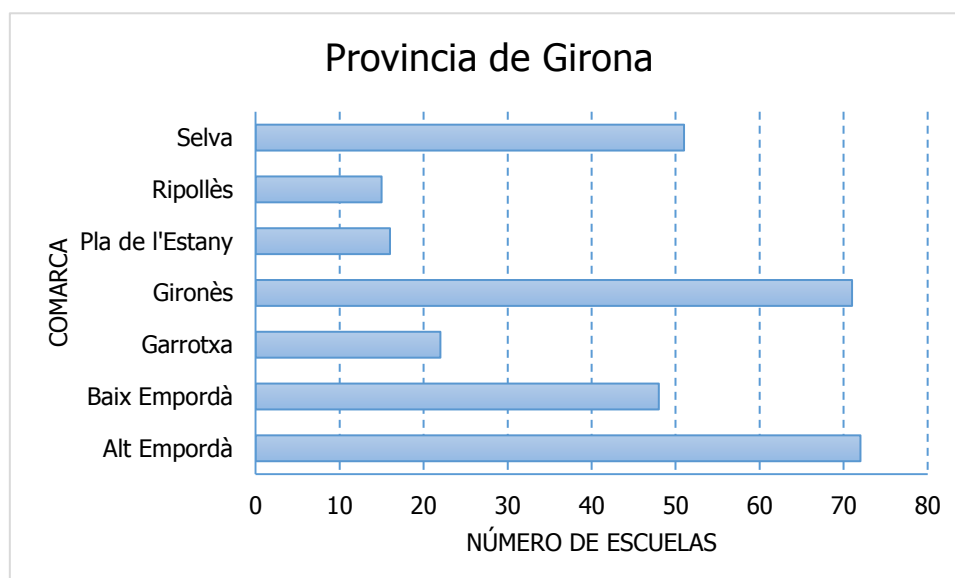


Figura 11. Número de escuelas por comarca para la Provincia de Girona (2016).

3.4. PELIGROSIDAD SÍSMICA

Como se ha explicado en el capítulo 1 la información sobre la peligrosidad sísmica del lugar se introduce en el programa en forma de curvas. La construcción de estas curvas para la provincia de Girona se lleva a cabo considerando la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada por Secanell y otros autores en 2004. A continuación, se explican los pasos seguidos para la obtención de las curvas:

- Intensidad media de Girona

Se obtiene un valor medio ponderado de intensidad, \bar{I}_{G-500} (Expresión 15), a partir de los valores estimados por Secanell y otros autores (I) en 2004 para cada municipio (i) de la provincia (período de retorno de 500 años). La ponderación se realiza en función del área del municipio (s) (Tabla 38, Anexo A). Se obtiene un valor medio ponderado de intensidad de 7.2.

$$\bar{I}_{G-500} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad \text{Expresión 15}$$

- Intensidad media de Barcelona

A partir de los valores de las curvas de peligrosidad de Barcelona estimados por Secanell et al. en 2004 (Tabla 11) se determina el valor de intensidad correspondiente a una frecuencia anual de excedencia (FAE) de 0.002 (período de retorno de 500 años). Se obtiene un valor de intensidad media (\bar{I}_{B-500}) de 6.5 (Figura 12).

Tabla 11. Valores de las tres curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al., 2004).

Curva media - σ		Curva media		Curva media + σ	
Intensidad	FAE	Intensidad	FAE	Intensidad	FAE
4.69	2.70E-02	5	2.70E-02	5.31	2.70E-02
5.69	4.90E-03	5.5	1.20E-02	5.5	2.13E-02
6.5	1.10E-03	6.5	1.90E-03	6.5	3.78E-03
7.4	1.00E-04	7.5	2.10E-04	7.5	5.05E-04
		8	6.20E-05	8.15	1.20E-04

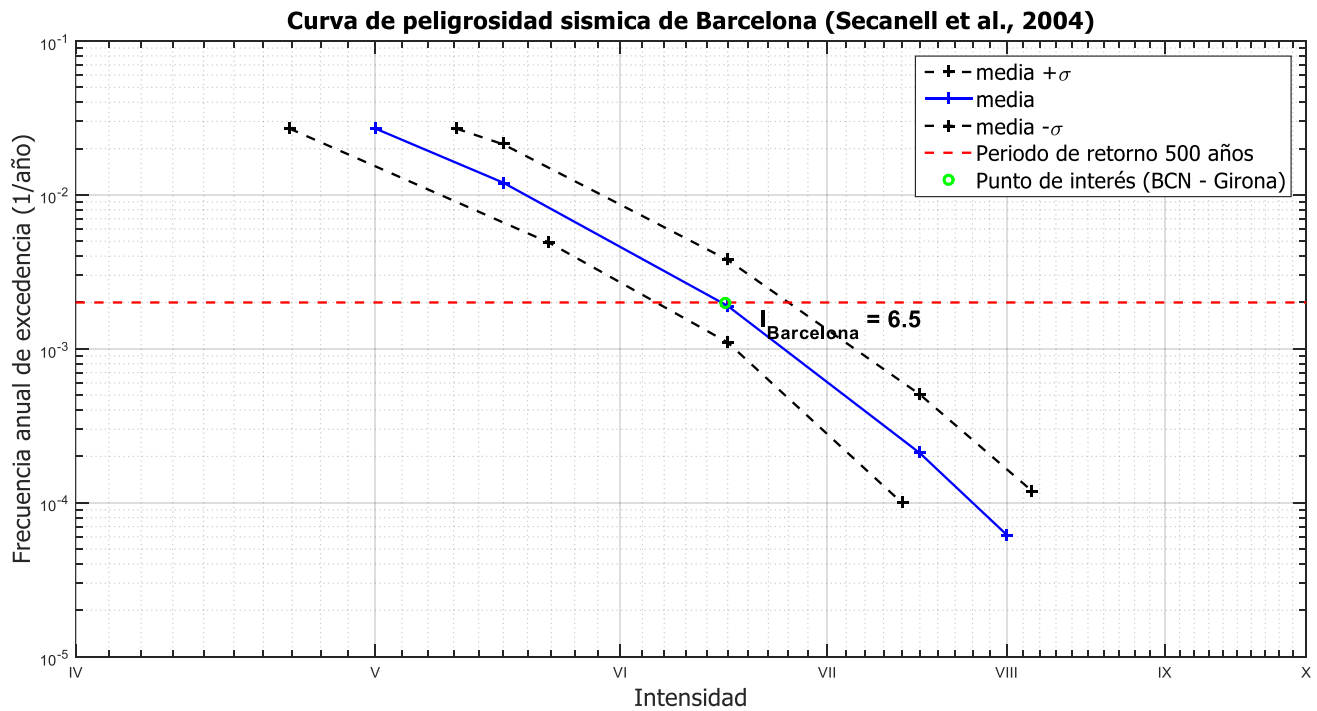


Figura 12. Curvas de peligrosidad de Barcelona (Secanell et al., 2004).

- Diferencia entre intensidades

Una vez conocidos los dos valores de intensidad para un período de retorno de 500 años en Barcelona y en la provincia de *Girona* se determina el incremento de intensidad entre ambas (Expresión 16).

$$\bar{I}_{G-500} - \bar{I}_{B-500} = 7.2 - 6.5 = 0.7099 \quad \text{Expresión 16}$$

- Curvas de peligrosidad sísmica

Por último, se aplica el incremento calculado en el paso tres a las intensidades de las tres curvas de peligrosidad de Barcelona (Tabla 12) para obtener los valores de las curvas de peligrosidad sísmica de la provincia de *Girona* (Figura 13).

Tabla 12. Valores de las tres curvas de peligrosidad sísmica de la provincia de *Girona*.

Curva media - σ		Curva media		Curva media + σ	
Intensidad	FAE	Intensidad	FAE	Intensidad	FAE
5.40	2.70E-02	5.71	2.70E-02	6.02	2.70E-02
6.40	4.90E-03	6.21	1.20E-02	6.21	2.13E-02
7.21	1.10E-03	7.21	1.90E-03	7.21	3.78E-03
8.11	1.00E-04	8.21	2.10E-04	8.21	5.05E-04
		8.71	6.20E-05	8.86	1.20E-04

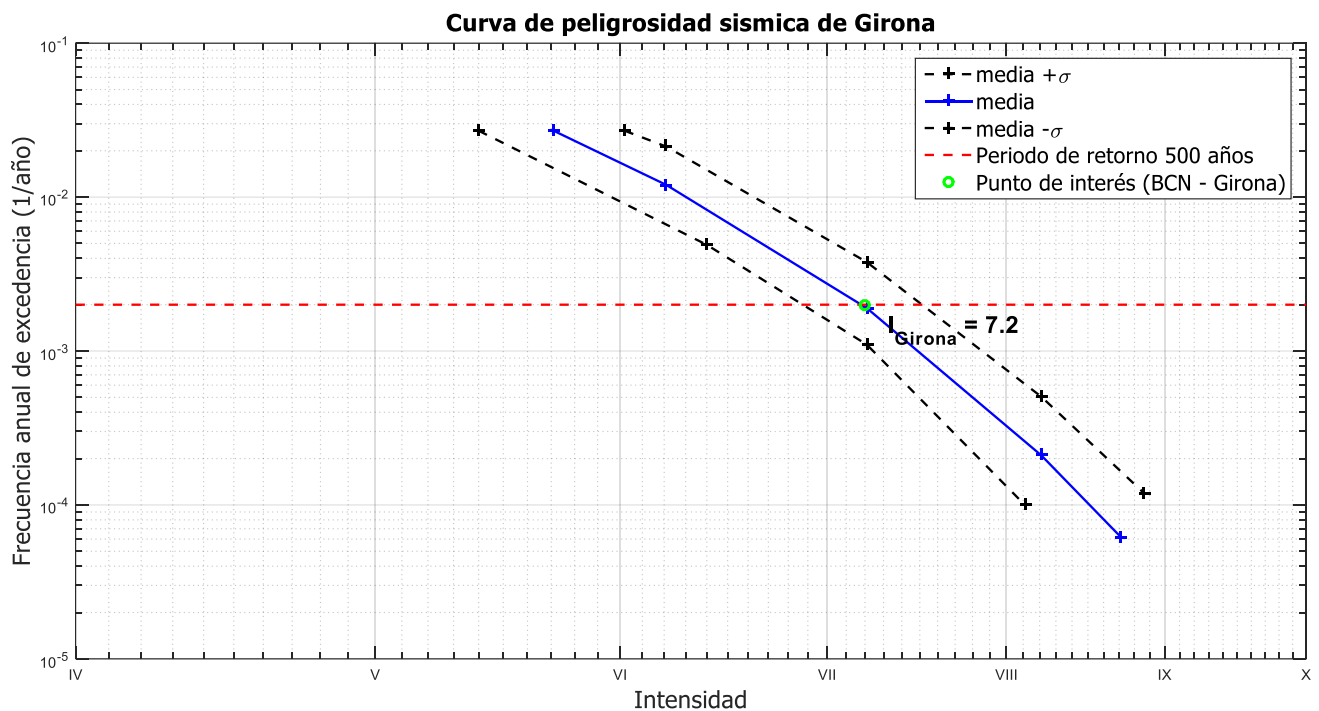


Figura 13. Curvas de peligrosidad de la provincia de *Girona*.

3.5. VULNERABILIDAD SÍSMICA Y DAÑO ESPERADO

A continuación, se exponen las consideraciones que se han tomado a la hora de determinar los valores de los elementos (17 en total) que componen el fichero de vulnerabilidad que debe introducirse al programa.

3.5.1. CÓDIGOS IDENTIFICATIVOS

En cuanto al número de orden del edificio dentro de la base de datos (elemento 1) se enumera cada edificio con un número entero que va desde el 1 hasta el 775. El código de identificación del edificio (elemento 2) es el mismo número que el elemento 1. El código de: parcela (elemento 3), manzana (elemento 4), zona censal (elemento 5), barrio (elemento 6) y distrito (elemento 7) es 1 para todos los edificios. Pues, debido a que los edificios están dispersos por toda la provincia de *Girona* no se considera necesario hacer mayor diferenciación.

3.5.2. CÓDIGO DE LA TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

El código de las tipologías asociadas a cada edificio (elemento 11) se toma de la base de datos fuente (Casado, 2012). En el caso de tipologías estándar se asignan los códigos de la matriz BTM (Tabla 2). Para las tipologías no estándar es necesario asociarles un código de la matriz BTM pues son éstos los que el programa tiene incorporados para posteriormente (en el cálculo) asignar un índice de vulnerabilidad.

3.5.2.1. APLICACIÓN A TIPOLOGÍAS NO ESTÁNDAR

Para asociar las tipologías no estándar a las que sí lo son es necesario conocer el índice de vulnerabilidad de ambas y compararlos. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para el cálculo de la mejor aproximación entre curvas de vulnerabilidad semi-empíricas para tipologías no estándar y estándar.

Los edificios denominados como M 3.1B podrían tener asociados la tipología M3.2 o tipología M3.3. Por ello, se estima un índice óptimo inicial como la media aritmética de los índices de éstas (Expresión 17). A partir de este índice y los valores de intensidad se obtiene un valor del índice de daño medio, para cada intensidad, que permiten definir la función semi-empírica de vulnerabilidad de la tipología M 3.1B (Figura 14).

$$I'_{v-M\ 3.1B} = \frac{V_{I-M\ 3.2}^* + V_{I-M\ 3.3}^*}{2} = \frac{0.776 + 0.704}{2} = 0.74 \quad \text{Expresión 17}$$

Para intensidades entre VI y XII y para los valores del índice de vulnerabilidad de todas las tipologías de mampostería de la BTM se obtiene el índice de daño medio (Expresión 14) y posteriormente las correspondientes curvas semi-empíricas de vulnerabilidad (Figura 15). Mediante una función de error se determina la mejor aproximación entre las curvas semi-empíricas de vulnerabilidad de las tipologías de la BTM y la M 3.1B (Figura 16). La mejor aproximación se obtiene para dos tipologías con el mismo índice de vulnerabilidad, M 1.2 y M 3.1. Finalmente, el código tipológico asociado a M3.1B es la M 3.1. ($V_{I-M\ 3.1}^* = 0.74$).

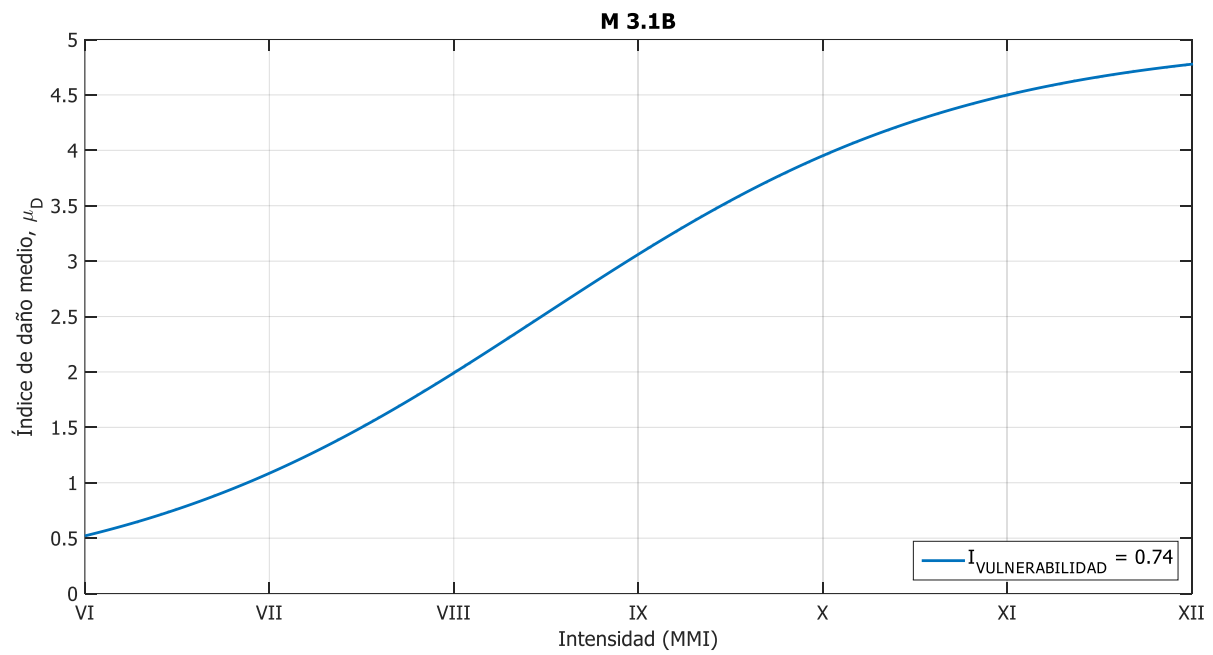


Figura 14. Curva semi-empírica de vulnerabilidad de la tipología M 3.1B

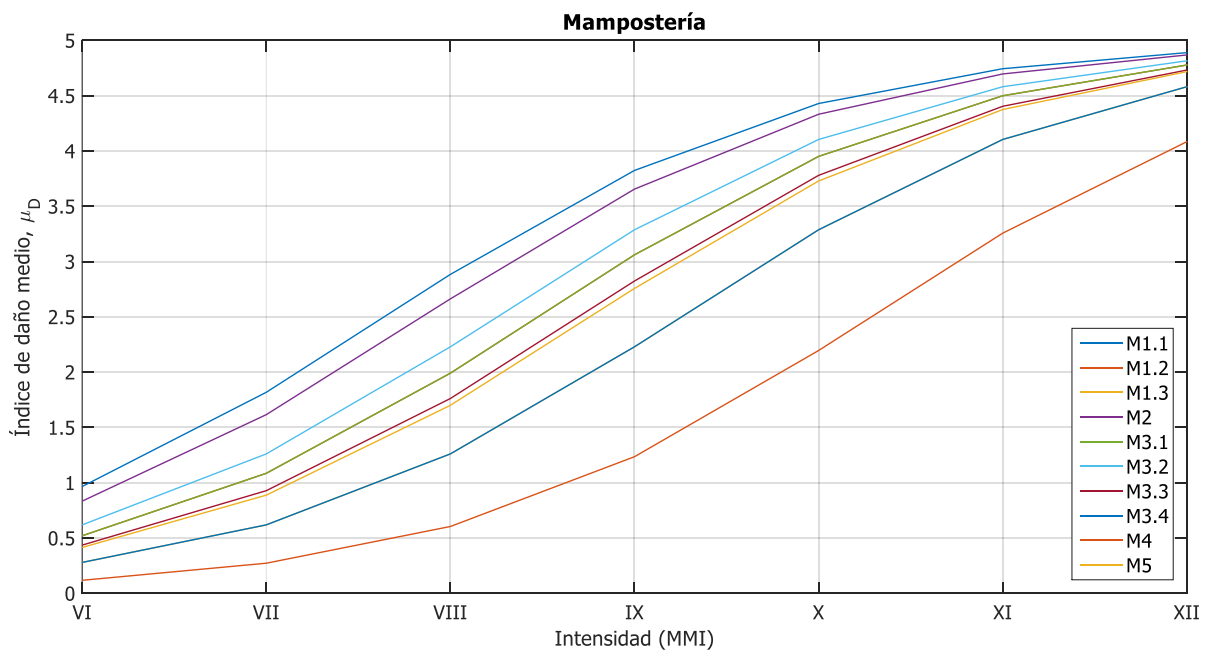


Figura 15. Curvas semi-empíricas de vulnerabilidad de diferentes estructuras de mampostería (BTM).

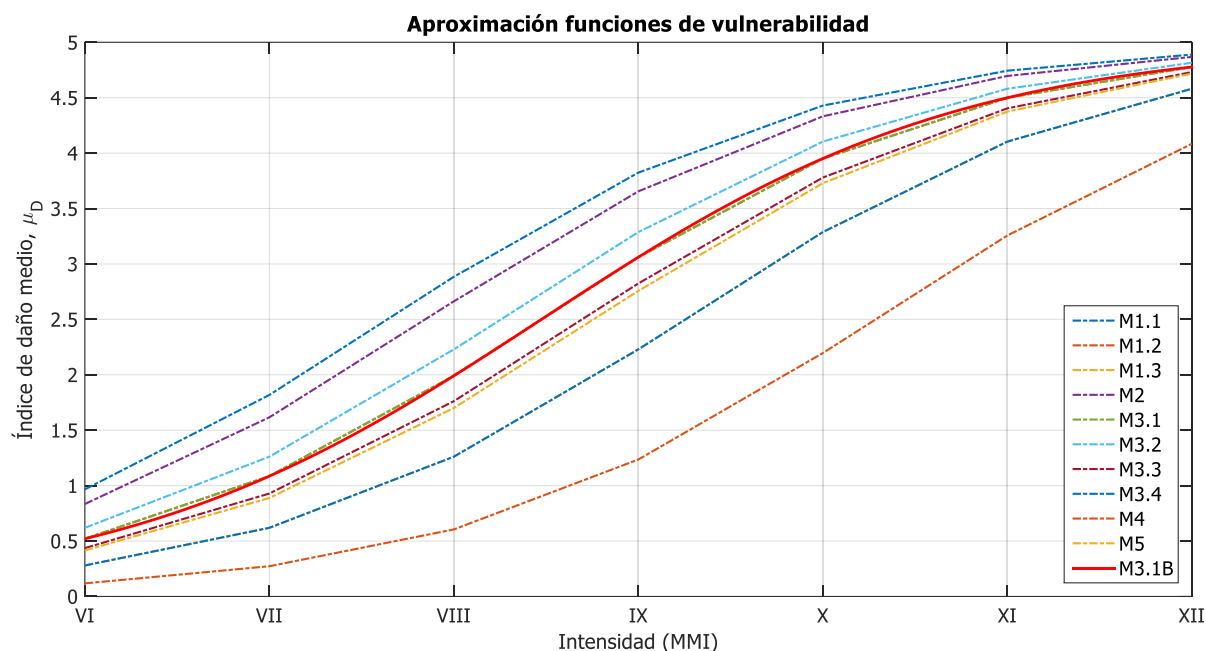


Figura 16. Aproximación funciones de vulnerabilidad tipologías de mampostería BTM y M 3.1B.

El procedimiento para estimar el índice de vulnerabilidad óptimo para los barracones y los edificios de muros de hormigón armado prefabricado (HAP) es similar al llevado a cabo para la tipología M 3.1B pero considerando la matriz de probabilidad de daño de cada tipología. Para ello, se determinan unas tipologías del informe ATC-13 que se asemejen a las características constructivas de las dos tipologías de estudio. La tipología barracón es compatible con la *Facility Class 23* (FC23) y la HAP a la 21 (FC21) (ATC-13, 1985). La FC 23 en el ATC-13 se define como casa móvil y la FC 21 como prefabricados de entre 1 y 3 niveles.

Los autores del ATC-13 determinan los valores de la probabilidad de daño considerando tres estimaciones del factor de daño esperado para cada nivel de intensidad: más bajo, óptimo y más alto (*low estimate* (Le), *best estimate* (Be) y *high estimate* (He) respectivamente). Estos parámetros fueron estimados por el panel de expertos del ATC-13 mediante el método Delphi y a cada tipología le corresponden tres valores diferentes por nivel de intensidad (Tabla 13). Los factores de daño más bajo y más alto contienen el 90% de la muestra y el valor óptimo se corresponde con el valor más probable.

Tabla 13. Estimaciones del factor de daño Le, Be, He considerados para las tipologías FC 21 y FC 23 (ATC-13, 1985)

		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
FC 21	Le	0.4	1.8	4.0	9.1	15.2	25.6	35.6
	Be	1.5	4.2	10.6	18.5	28.7	45.0	62.5
	He	4.2	9.6	18.2	31.6	49.2	69.4	80.2
FC 23	Le	0.0	0.9	2.0	6.4	17.9	24.5	39.7
	Be	0.9	3.0	6.2	15.8	28.7	39.8	56.8
	He	4.7	11.0	17.4	29.1	41.8	55.2	71.6

ATC-13 considera siete estados de daño, incluido el estado de daño nulo. Sin embargo, RISK-UE considera seis estados de daño (Tabla 6 y 7). Es necesario llevar a cabo una correlación de los estados de daño para poder obtener la matriz de probabilidad de daño en base a los que considera Risk-UE (Tabla 15). Para ello, se atiende a las descripciones que cada metodología hace sobre el daño (Tabla 14).

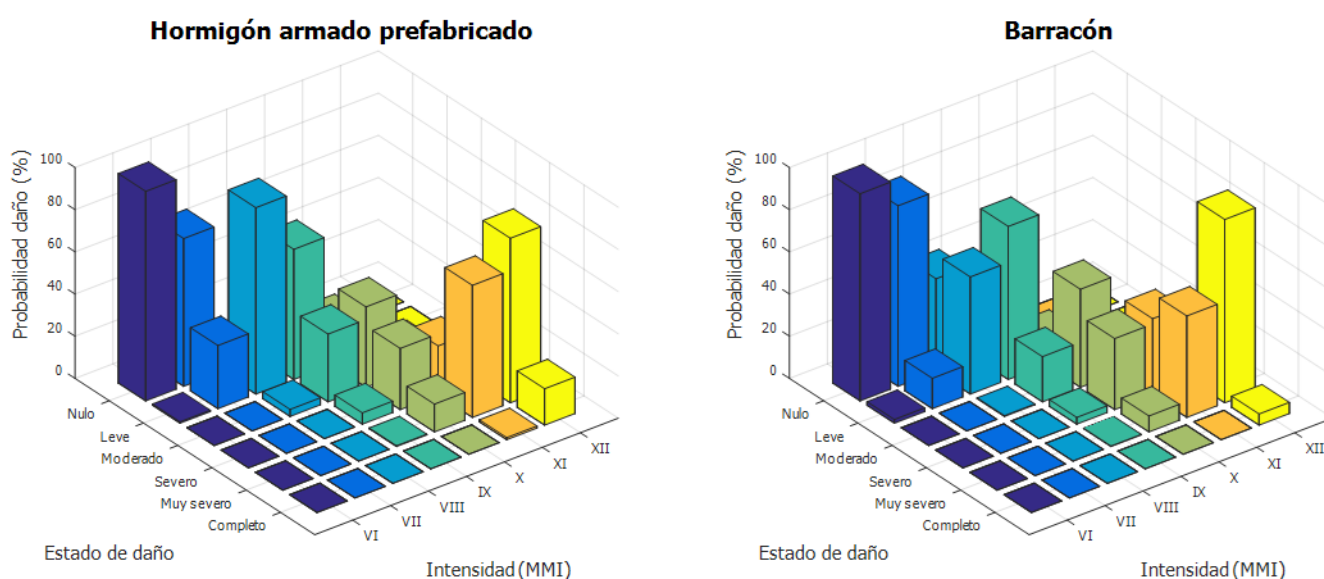
Tabla 14. Niveles de daño considerados por ATC – 13 y Risk-UE (MIV).

ATC - 13			Risk-UE	
Daño (%)	Descripción	Grado de daño	Descripción	
0	Nulo. Ningún daño	0.0 – 0.5	Nulo. Ningún daño	
0 - 1	Insignificante. Daños mínimos localizados sin necesidad de reparación.	0.5 – 1.5	Leve. Entre daño ligero e insignificante.	
1 - 10	Leve. Daño significativo localizado en algunos elementos. Normalmente no requiere reparación.	1.5 – 2.5	Moderado. Daño estructural ligero y moderado no estructural.	
10 - 30	Moderado. Daño significativo de muchos elementos. Se requiere reparación. Comienza el daño estructural.	2.5 – 3.5	Severo. Daño estructural moderado y fuerte no estructural.	
30 - 60	Fuerte. Daño exhaustivo con necesidad de grandes reparaciones.	3.5 – 4.5	Muy severo. Gran daño estructural y muy grande no estructural.	
60 - 100	Grave. Daño grave generalizado. Puede implicar el colapso, demolición o reparación de la estructura.	4.5 – 5.0	Destrucción. Daño estructural muy grande, total o casi total colapso.	
100	Destrucción. Destrucción total de la mayoría de la estructura.			

Tabla 15. Correlación de los estados de daño entre ATC - 13 y Risk -UE.

Daño (%)	Factor central	Grado de daño ATC -13	Grado de daño Risk-UE
0 - 5	2.5	Nulo + Insignificante	Nulo (0.0 - 0.5)
5 - 20	12.5	Leve	Leve (0.5 - 1.5)
20 - 30	25	Moderado	Moderado (1.5 - 2.5)
30 - 40	35	Fuerte	Sustancial (2.5 - 3.5)
40 - 75	57.5	Grave	Muy fuerte (3.5 - 4.5)
75 - 100	87.5	Destrucción	Destrucción (4.5 - 5.0)

Tras ensayar diferentes funciones de probabilidad, ATC-13 escoge la distribución beta para obtener la probabilidad de daño de cada tipología (Expresión 2) y construir así la matriz de probabilidad de daño (Figura 17).

**Figura 17.** Matriz de probabilidad de daño de las tipologías no estándar.

A partir de la matriz de probabilidad de daño se calcula el grado de daño medio (DM_I) para cada intensidad (Expresión 18) y se obtiene la función que mejor ajusta estos valores (Figura 18). Para poder ajustar los puntos con mayor precisión se han modificado de forma iterativa los índices que definen los rangos superior e inferior de los estados de daño de ATC - 13 (columna 1 Tabla 15).

$$DM_I = \sum_{i=0}^N i \cdot P(DM_{i,I}) \quad \text{Expresión 18}$$

Siendo i el número correspondiente a cada uno de los estados de daño, que va desde 0 a N (número de estados total considerado, 6) y $P(DM_{i,I})$ la probabilidad de daño obtenida para cada uno de los estados de daño y una intensidad.

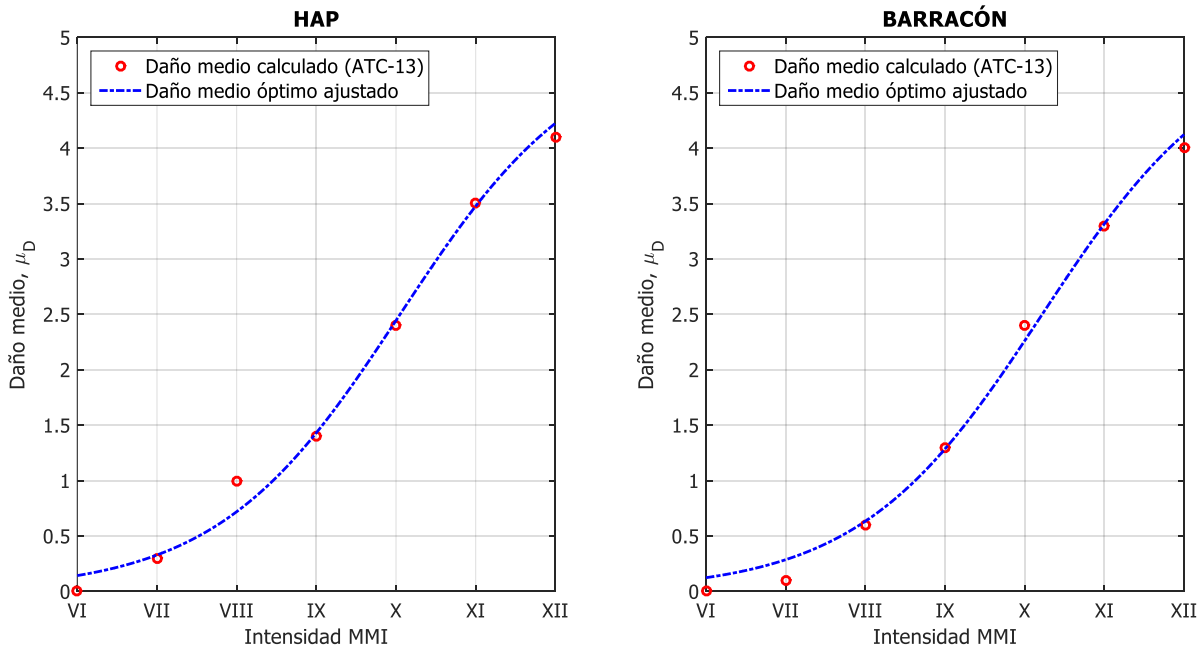


Figura 18. Curvas semi-empíricas de vulnerabilidad ajustadas a partir de índices de daño medio calculados para las tipologías barracón y HAP.

Al igual que para la tipología M 3.1B se aplica una función de error para determinar la mejor aproximación entre las curvas semi-empíricas de vulnerabilidad de las tipologías de la BTM y la de barracón (Figura 19) y HAP (Figura 20). Se extrae entonces una curva por cada clase de vulnerabilidad que mejor se aproxima a la curva de la tipología no estándar, en total son cuatro (mampostería, hormigón armado, acero y madera). Nuevamente se aplica la función de error y así se determina la tipología BTM que mejor se aproxima a las no estándar, y por consiguiente, el código tipológico que debe asociarse al barracón (Figura 21) y a la tipología HAP (Figura 22).

Para los barracones se estima un índice de vulnerabilidad óptimo de 0.4510, asociado al código de la tipología de mampostería M4. Por otro lado, para la tipología HAP se estima un índice de vulnerabilidad óptimo de 0.4840, asociado al código de la tipología de acero S3.

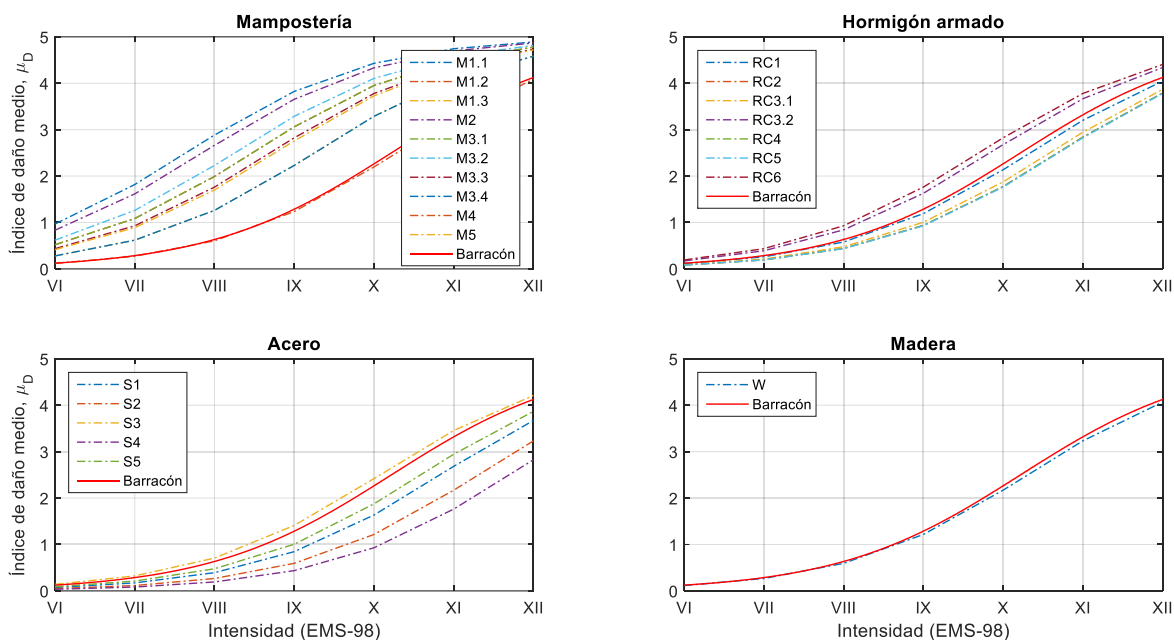


Figura 19. Aproximación funciones de vulnerabilidad tipologías BTM y Barracón.

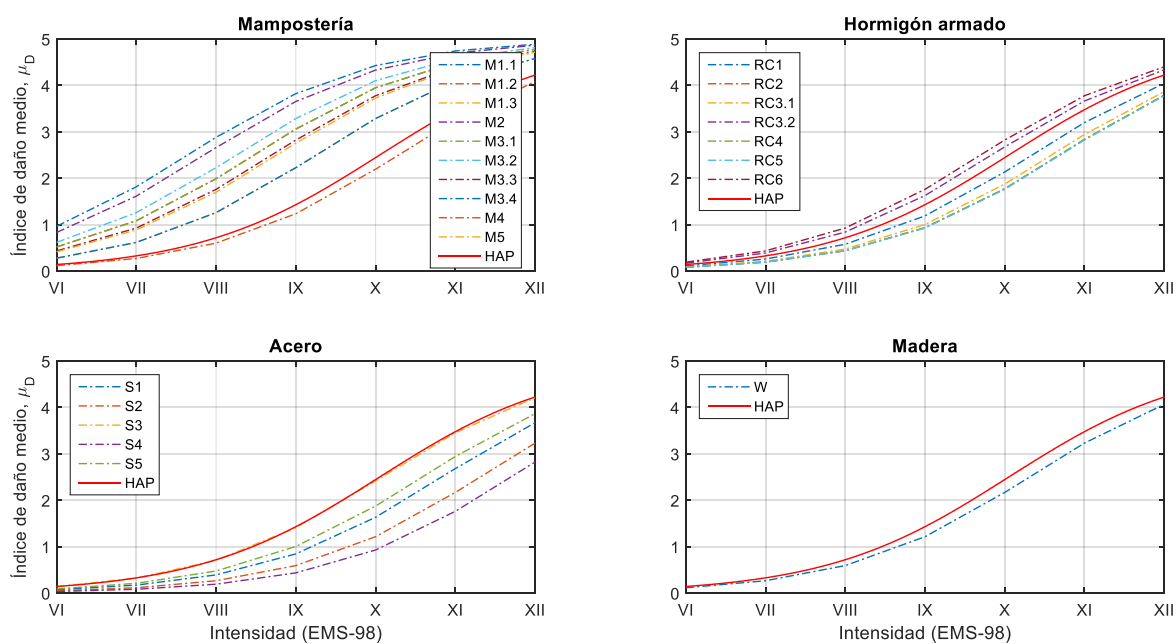


Figura 20. Aproximación funciones de vulnerabilidad tipologías BTM y HAP.

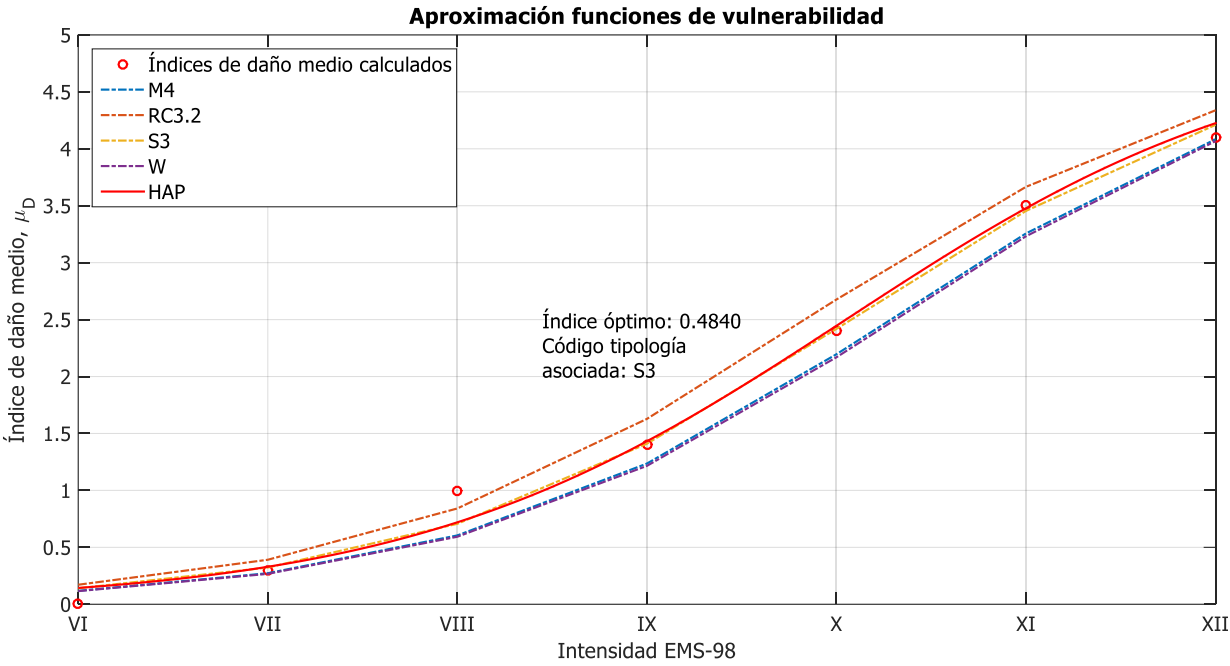


Figura 21. Aproximación funciones de vulnerabilidad de 4 tipologías BTM y Barracón.

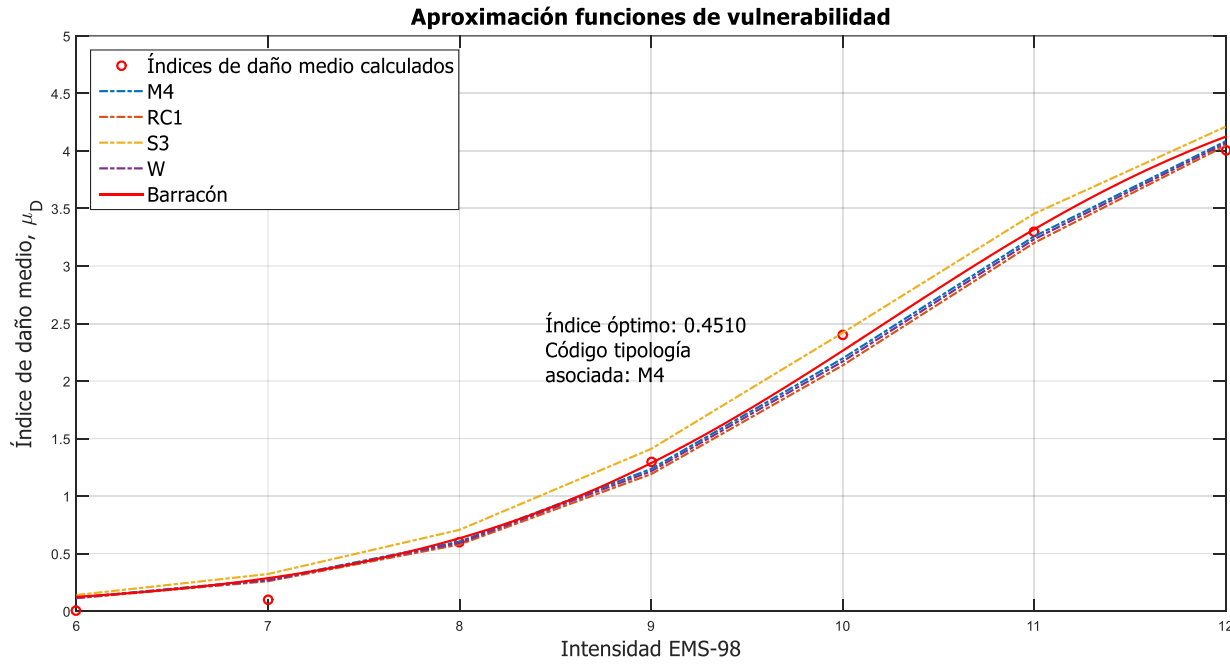


Figura 22. Aproximación funciones de vulnerabilidad de 4 tipologías BTM y HAP.

3.5.3. FACTOR DE FIABILIDAD AL ESTIMAR LA TIPOLOGÍA

Para determinar el factor de fiabilidad (elemento 12 de la Tabla 5) se tienen tres consideraciones, en función de cómo se ha determinado su tipología estructural:

1. Para los edificios cuya tipología se ha determinado en base a los planos de construcción y la visita a los mismos se considera un factor de 7, existen 7 edificios con este factor.
2. Para los edificios cuya tipología se ha estimado a través de fotografías se considera un factor de 6, un total de 538 edificios tienen este factor asociado.
3. Y para los edificios cuyas tipologías no son estándar se considera un factor 5, 230 edificios tienen este factor asociado.

3.5.4. CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO

Los siguientes datos se han tomado de la base de datos fuente (Casado, 2012): el valor del área en metros cuadrados, el perímetro en metros, el número de niveles, el año de construcción, el estado de conservación, la posición en manzana (para edificios no aislados) y la diferencia de altura con edificios adyacentes (elementos 8, 9, 10, 13, 15, 16 y 17 respectivamente de la Tabla 5).

3.5.5. ZONA SÍSMICA

Debido a que la respuesta sísmica varía en función del tipo de suelo sobre el cual se sitúa el edificio el programa USERISK considera la zonificación de suelos propuesta por Cid y otros autores en 2001 para Barcelona (Tabla 16).

Para la provincia de *Girona* se adopta la misma zonificación. Pero es necesario estudiar las diferentes litologías y edades que se localizan en toda la provincia (IGME, 2009). En función de las descripciones mostradas en la Tabla 16 y el estudio que se ha llevado a cabo sobre las litologías y edades de las mismas en *Girona* se clasifican las dichas litologías (Tabla 17) y se determina la zona sísmica a la cual pertenece cada uno de los edificios, lo que permite considerar el elemento equivalente del programa USERISK y así incorporar el tipo de suelo al estudio mediante el elemento 14 de la Tabla 5.

Tabla 16. Descripción de los suelos para Barcelona (Cid et al., 2001).

ZONA SÍSMICA	DESCRIPCIÓN
R	Afloramientos rocosos del paleozoico y terciario.
I	Afloramientos holocenos. Suelos con una velocidad de la onda de corte promedio $V_s = 200$ m/s para profundidades mayores a 20 m. Se encuentra una capa de material cuaternario en un rango entre 25-70 m por encima de la capa de material terciario. Bajo estas capas se encuentra el basamento paleozoico con profundidades menores a 350 m.
II	Afloramientos pleistocenos con sustrato terciario, de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta. Velocidad de ondas de corte promedio $V_s = 300$ m/s.
III	Afloramientos pleistocenos sin sustrato terciario, de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta. Esquemáticamente, la columna del subsuelo puede ser representada por una capa de materiales cuaternarios arriba del basamento del paleozoico.
A	Terreno artificial

Tabla 17. Clasificación de las litologías de *Girona*.

ZONA I	ZONA II	ZONA III	ROCA
Arenas, limos, cantos rodados y materia orgánica.	Arcillas, limos, gravas, costras calcáreas + margas, areniscas y conglomerados	Arcillas, limos, gravas, costras calcáreas + basamento granitos, pizarras, calizas.	Afloramientos rocosos
Litología 102: Gravas, arenas, arcillas y limos, Aluvial, playas, flechas litorales.	Litología 79: margas y arcillas con niveles turbidíticos. Margocalizas y calizas margosas (capas rojas).	Litología 45: areniscas, pizarras, cuarcitas ocalizas y conglomerados.	Litología 12: granitos biotíticos.
	Litología 82: areniscas silíceas y arcillas.	Litología 55: pizarras y areniscas.	Litología 94: Rocas volcánicas calcoalcalinas (
	Litología 91: conglomerados, areniscas, arenas arcosas, arcillas, calizas y yesos.	Litología 84: turbiditas calcáreas, calizas, margas, conglomerados, areniscas y arcillas.	Litología 97: Basaltos alcalinos.
	Litología 92: conglomerados, calizas y margas. Margas con allostromas de origen diverso.	Litología 85: turbiditas calcáreas, calizas, margas. Pudignas, areniscas y margas arenosas.	Litología 14: complejos ácidos y básicos indiferenciados
	Litología 96: Conglomerados, arenas, arrecifes, limos amarillos, yesos y sales haloideas.	Litología 98: conglomerados, areniscas y limos amarillos.	Litología 46: esquistos y paragneises.
	Litología 101: conglomerados, gravas, arenas, areniscas, limos, arcillas. Terrazas fluviales y marinas.		

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS

Se obtienen funciones de vulnerabilidad y curvas de daño para todos los edificios de estudio, pero en el presente apartado se muestra un ejemplo de edificio para cada clase de vulnerabilidad: mampostería, hormigón armado, acero, barracón, muros prefabricados de hormigón armado y mampostería con forjado desconocido.

La estimación del índice de daño medio es útil para comprobar la seguridad de instalaciones, en este caso edificios, expuestas a determinados escenarios sísmicos. Por ello, a través de mapas, se representa el índice de daño medio para las escuelas de Girona y las dos comarcas con mayor número de escuelas: *Alt Empordà* y *Gironès*.

Para obtener el índice de daño medio de las escuelas, a partir de los valores del índice de daño medio de los edificios de una misma escuela, se obtiene un valor medio de dicho índice para la curva mejor.

4.1.1. APLICACIÓN A TIPOLOGÍAS ESTÁNDAR

A continuación, se muestran los resultados de vulnerabilidad y daño obtenidos para un edificio de mampostería con muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada (M 1.1), uno de hormigón armado resistente a momento (RC 1) y uno de acero resistente a momento (S 1).

- Mampostería (Figura 23)

El edificio pertenece a la *Escola Gonçal Comellas –Zer La Garriga*, escuela pública de educación infantil y primaria. Está ubicada en la calle *Escoles 3* del municipio de *Avinyonet de Puigventós*, en la comarca del *Alt Empordà*. Es un edificio construido en 1955 de una planta y con un índice básico medio de vulnerabilidad de 0.873.

En la Figura 24 se muestran las curvas de vulnerabilidad acumulativa (izquierda) y no acumulativa (derecha) para un edificio de la tipología M 1.1. Además, en la Tabla 18 se muestran los valores numéricos del índice de vulnerabilidad para las probabilidades de excedencia 95%, 50% y 5%.



Figura 23. Edificio de mampostería de la *Escola Gonçal Comella – Zer La Garriga* (Casado, 2012).

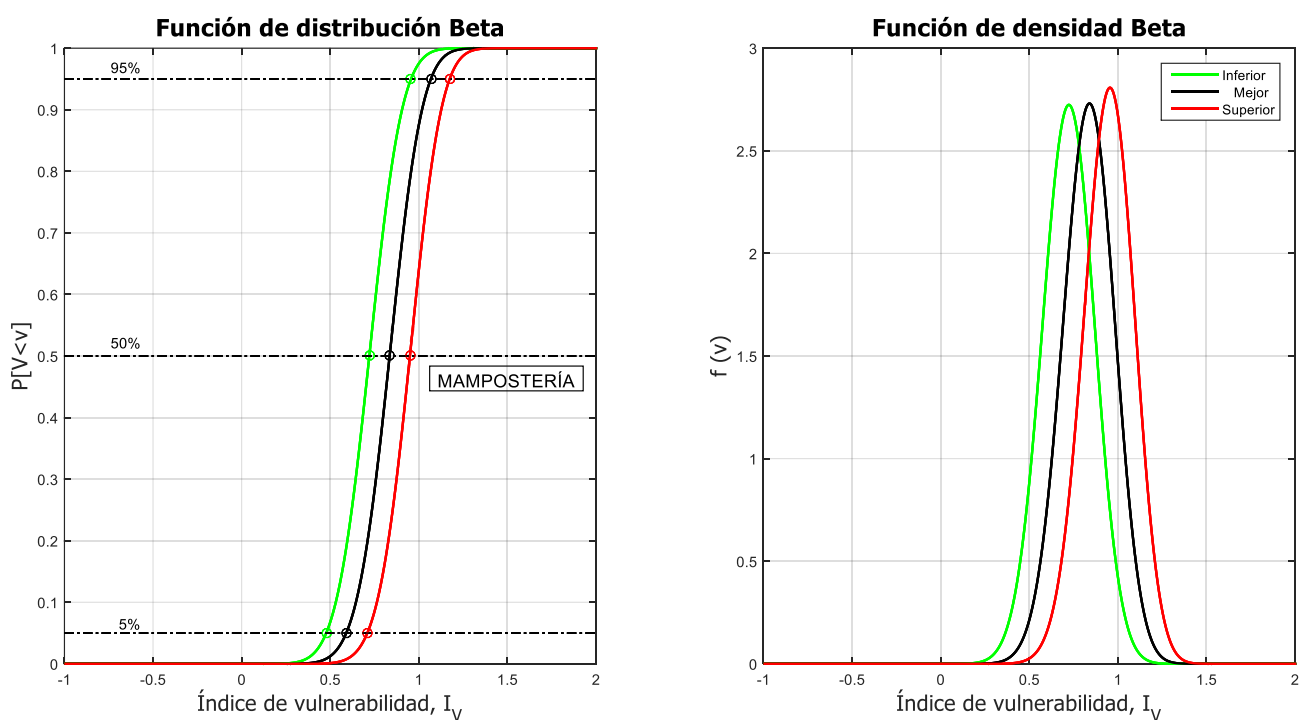


Figura 24. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de mampostería.

Tabla 18. Índices de vulnerabilidad para un edificio de mampostería.

	95%	50%	5%
Curva inferior	0.9562	0.7206	0.4774
Curva mejor	1.0681	0.8352	0.5903
Curva superior	1.1742	0.9497	0.7093

En la Figura 25 se muestran las funciones de daño para un rango de intensidades que va desde VI hasta XII. En la Tabla 19 se muestran los valores del índice de daño para

cada una de las intensidades (VI-XII) y para los percentiles 95, 50 y 5 para la curva mejor de vulnerabilidad.

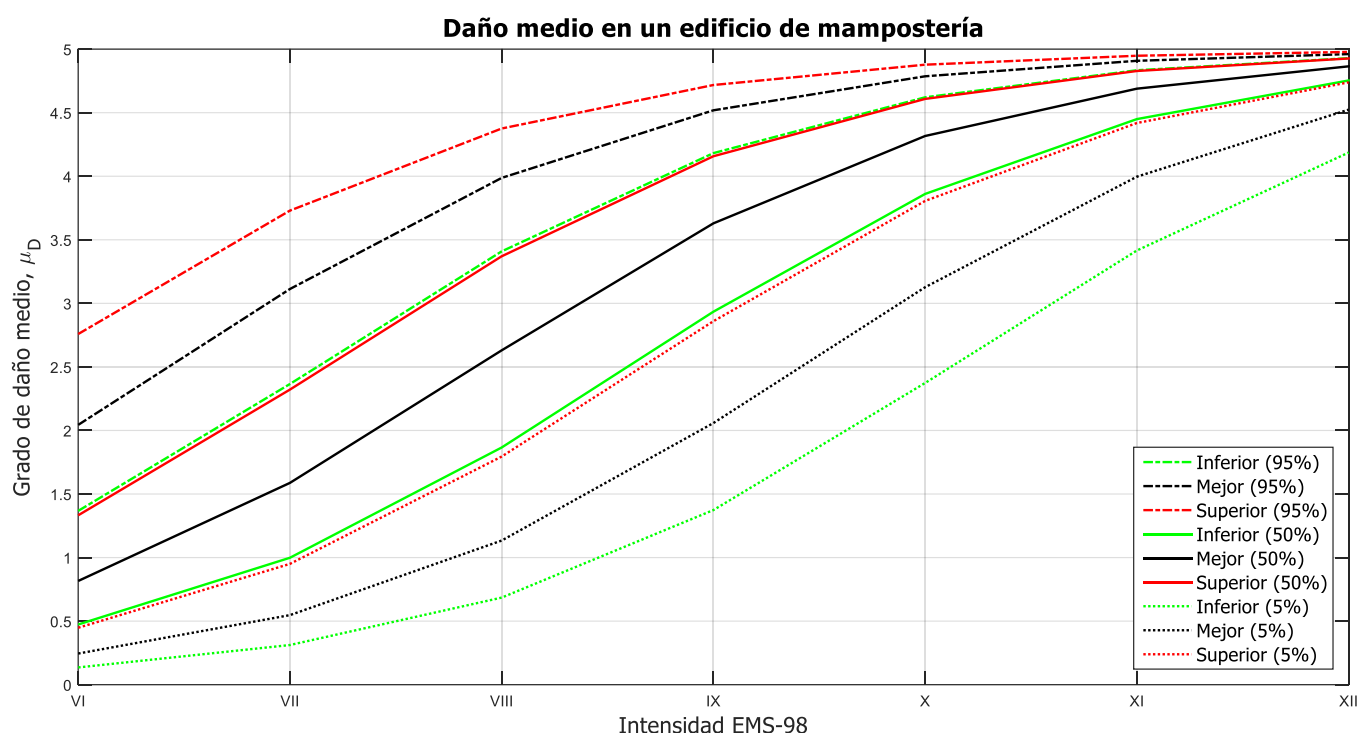


Figura 25. Curvas de daño para un edificio de mampostería.

Tabla 19. Índices de daño medio para un edificio de mampostería.

	Percentil 95	Percentil 50	Percentil 5
VI	2.0439	0.8159	0.245
VII	3.1129	1.5876	0.5473
VIII	3.987	2.6303	1.1339
IX	4.5188	3.6295	2.0584
X	4.7864	4.3168	3.127
XI	4.9082	4.689	3.9966
XII	4.9611	4.8647	4.524

- Hormigón armado (Figura 26)

El edificio pertenece al Instituto de Educación Secundaria *Montsacopa*, escuela pública. Está ubicado en la *Av. Joan Cabirol S/N*, del municipio de *Olot*, en la comarca de *La Garrotxa*. Es un edificio construido en 1909 de dos plantas y con un índice básico medio de vulnerabilidad de 0.442.

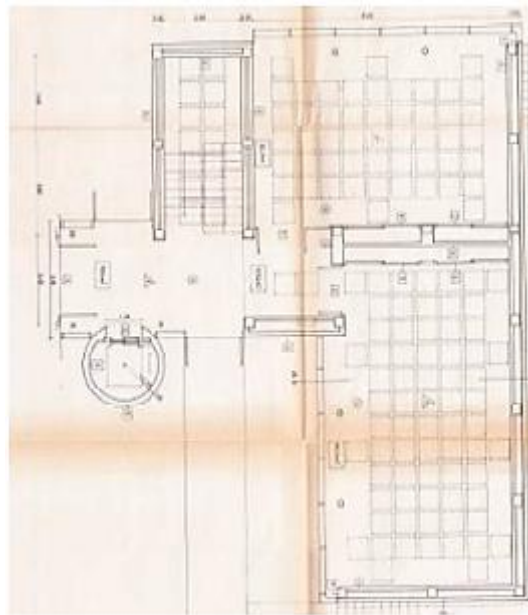


Figura 26. Plano de la vista en planta del edificio de hormigón armado del instituto *Montsacopa* (Casado 2012).

En la Figura 27 se muestran las curvas de vulnerabilidad acumulativa (izquierda) y no acumulativa (derecha) para un edificio de la tipología RC 1. Además, en la Tabla 20 se muestran los valores numéricos del índice de vulnerabilidad para las probabilidades de excedencia 95%, 50% y 5%.

Tabla 20. Índices de vulnerabilidad para un edificio de hormigón armado.

	95%	50%	5%
Curva inferior	0.7235	0.1690	-0.3269
Curva mejor	0.9971	0.4399	-0.1060
Curva superior	1.2584	0.7121	0.1230

En la Figura 28 se muestran las funciones de daño para un rango de intensidades que va desde VI hasta XII. En la Tabla 21 se muestran los valores del índice de daño para cada una de las intensidades (VI-XII) y para los percentiles 95, 50 y 5 para la curva mejor de vulnerabilidad.

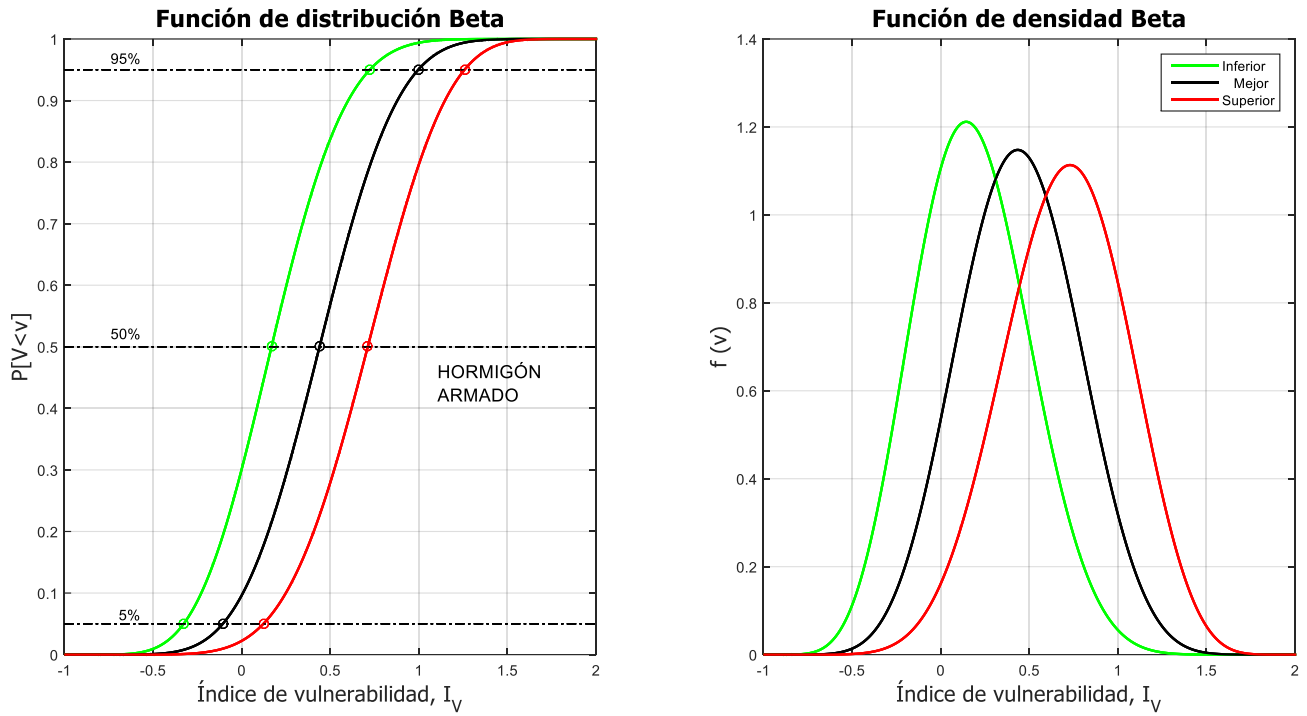


Figura 27. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de hormigón armado.

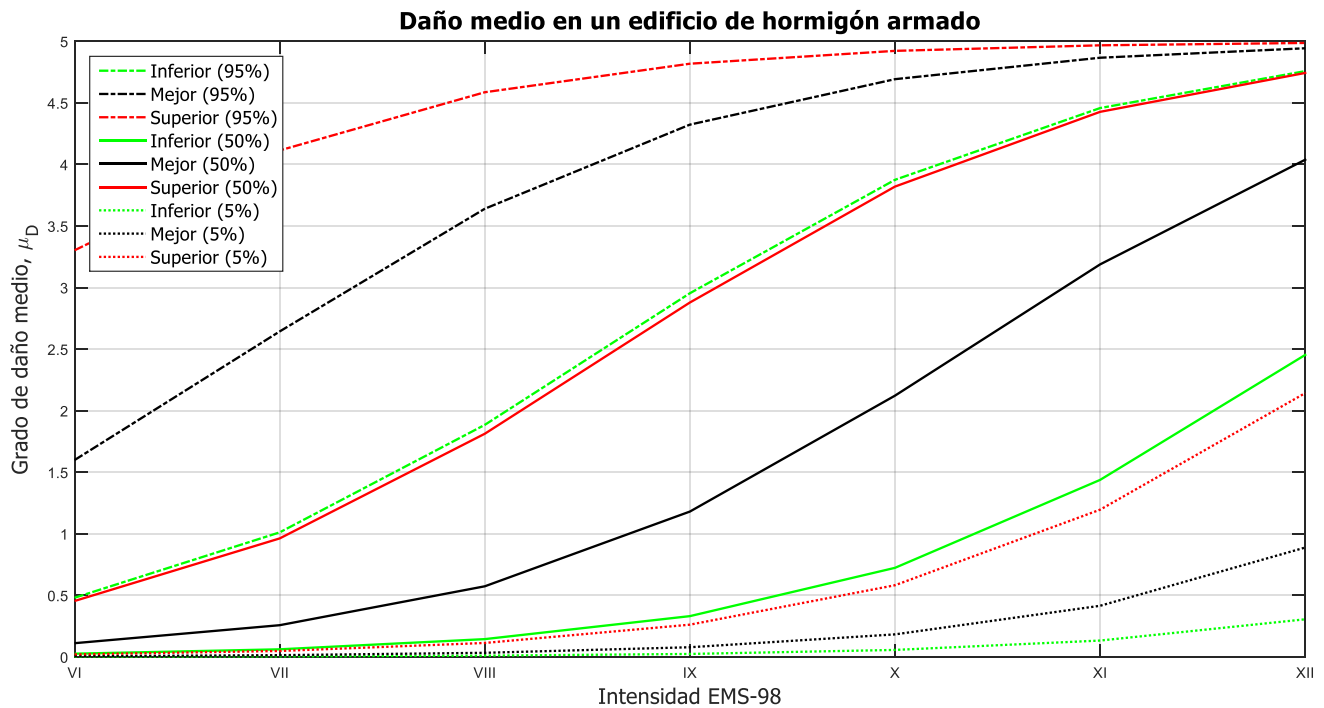


Figura 28. Curvas de daño para un edificio de hormigón armado.

Tabla 21. Índices de daño medio para un edificio de hormigón armado.

	Percentil 95	Percentil 50	Percentil 5
VI	1.5988	0.112	0.0058
VII	2.6432	0.2574	0.0139
VIII	3.6397	0.5733	0.0331
IX	4.3229	1.1803	0.0783
X	4.6920	2.1218	0.1828
XI	4.8661	3.1877	0.4150
XII	4.9430	4.0378	0.8881

- Acero (Figura 29)

El edificio pertenece a la *Escola Annexa – Joan Puigbert*, escuela pública de educación infantil y primaria. Está ubicada en la calle *d'Isabel la Catòlica 24*, del municipio de *Girona*, en la comarca *Gironès*. Es un edificio construido en 2010 de cuatro plantas y con un índice básico medio de vulnerabilidad de 0.363. El edificio presenta grandes irregularidades en planta. El programa USERISK penaliza la vulnerabilidad de estas irregularidades incorporando el factor RC (Tabla 4).

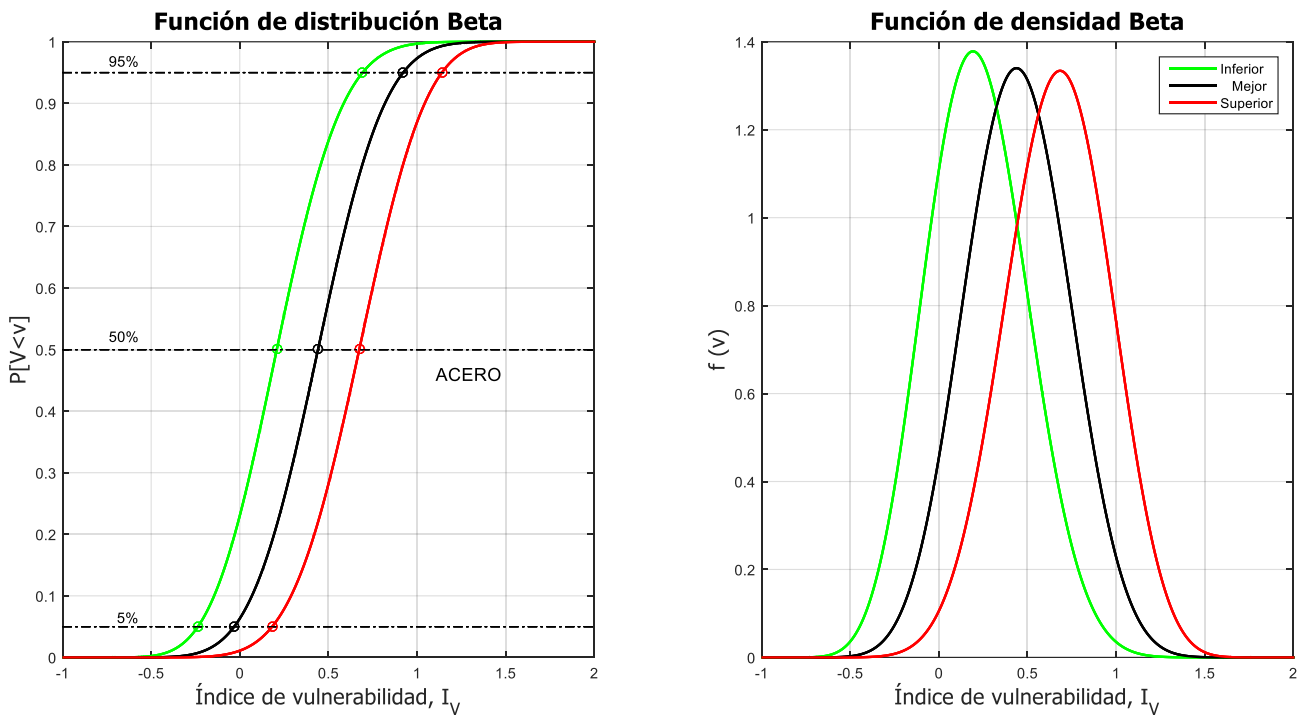


Figura 29. Edificio de acero de la Escola Annexa – Joan Puigbert (Casado, 2012).

En la Figura 30 se muestran las curvas de vulnerabilidad acumulativa (izquierda) y no acumulativa (derecha) para un edificio de la tipología RC 2. Además, en la Tabla 22 se muestran los valores numéricos del índice de vulnerabilidad para las probabilidades de excedencia 95%, 50% y 5%.

Tabla 22. Índices de vulnerabilidad para un edificio de acero.

	95%	50%	5%
Curva inferior	0.6935	0.2088	-0.2361
Curva mejor	0.9225	0.4415	-0.0314
Curva superior	1.1411	0.6744	0.183

**Figura 30.** Curvas de vulnerabilidad para un edificio de acero.

En la Figura 31 se muestran las funciones de daño para un rango de intensidades que va desde VI hasta XII. En la Tabla 23 se muestran los valores del índice de daño para cada una de las intensidades (VI-XII) y para los percentiles 95, 50 y 5 para la curva mejor de vulnerabilidad.

Tabla 23. Índices de daño medio para un edificio de acero.

	Percentil 95	Percentil 50	Percentil 5
VI	1.1930	0.1122	0.0088
VII	2.1391	0.2596	0.0209
VIII	3.2040	0.5777	0.0495
IX	4.0484	1.1881	0.1165
X	4.5518	2.1324	0.2692
XI	4.8018	3.1977	0.5977
XII	4.9150	4.0445	1.2234

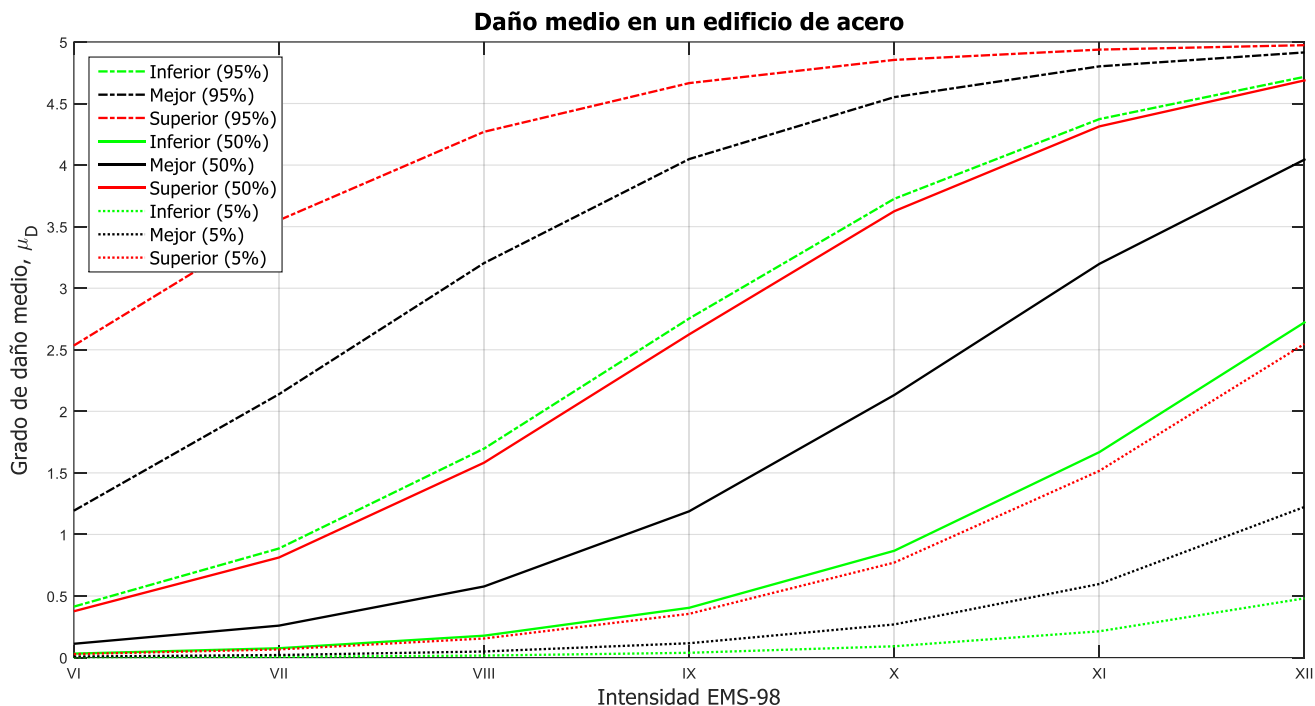


Figura 31. Curvas de daño para un edificio de acero.

4.1.2. APLICACIÓN A TIPOLOGÍAS NO ESTÁNDAR

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para un edificio de tipo barracón, uno de muros prefabricados de hormigón armado y uno de mampostería del cual se desconoce el tipo de forjado.

- Barracón (Figura 32)

El edificio pertenece a la *Escola Bora Gran – Zer les Goges*, escuela pública de educación infantil y primaria. Está ubicada en la *Pl. de l'Ajuntament 6*, del municipio de *Serinyà*, en la comarca *Pla de l'Estany*. Es un edificio construido en 2001 de una planta y con un índice básico medio de vulnerabilidad de 0.451.

En la Figura 33 se muestran las curvas de vulnerabilidad acumulativa (izquierda) y no acumulativa (derecha) para un edificio de tipo barracón. Además, en la Tabla 24 se muestran los valores numéricos del índice de vulnerabilidad para las probabilidades de excedencia 95%, 50% y 5%.



Figura 32. Barracón de la *Escola Bora Gran – Zer les Goges* (*Street View Google*, 2013).

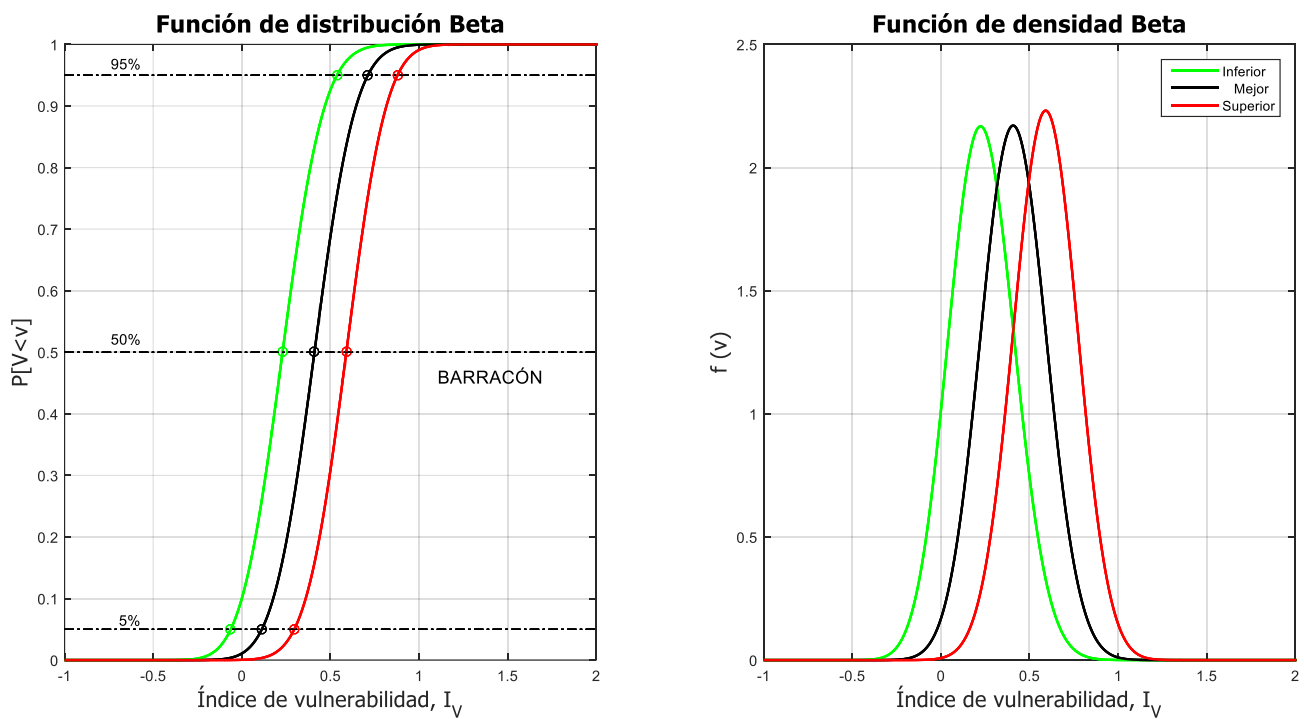


Figura 33. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de tipo barracón.

Tabla 24. Índices de vulnerabilidad para un edificio de tipo barracón.

	95%	50%	5%
Curva inferior	0.5374	0.2301	-0.0622
Curva mejor	0.7118	0.4101	0.1132
Curva superior	0.8790	0.5900	0.2964

En la Figura 34 se muestran las funciones de daño para un rango de intensidades que va desde VI hasta XII. En la Tabla 25 se muestran los valores del índice de daño para cada una de las intensidades (VI-XII) y para los percentiles 95, 50 y 5 para la curva mejor de vulnerabilidad.

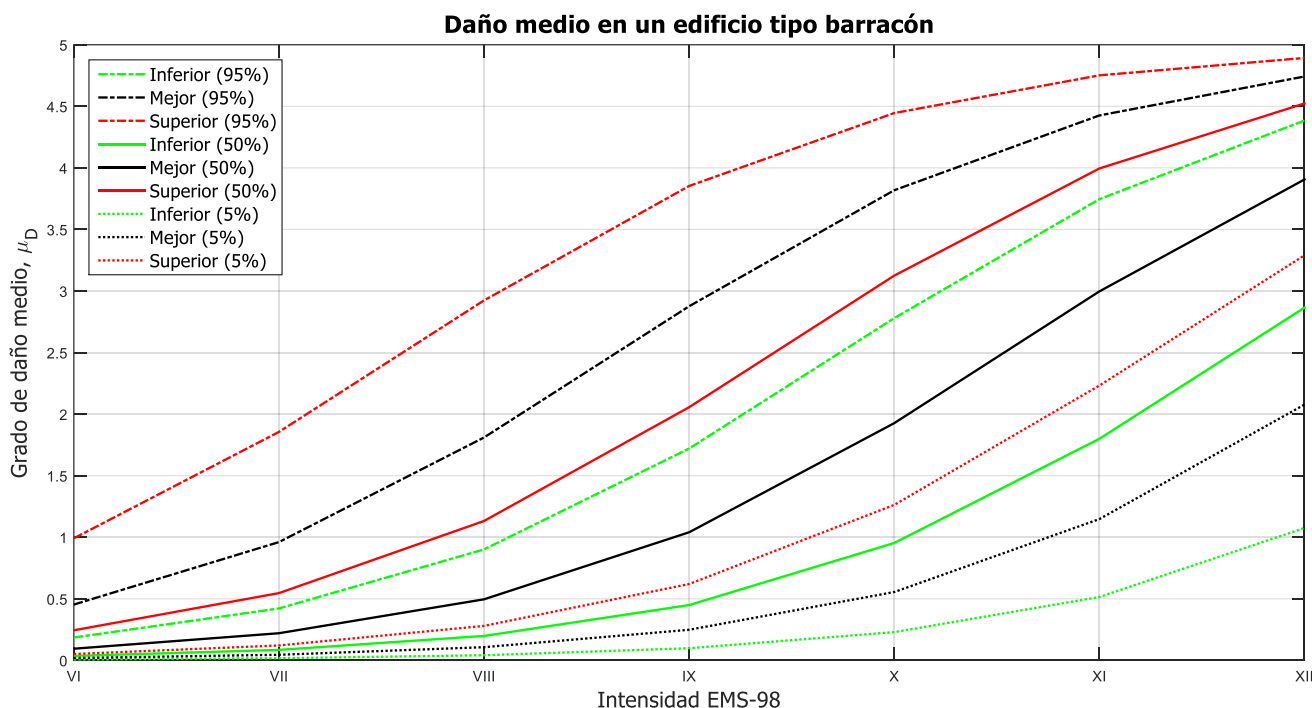


Figura 34. Curvas de daño para un edificio de tipo barracón.

Tabla 25. Índices de daño medio para un edificio de tipo barracón.

	Percentil 95	Percentil 50	Percentil 5
VI	0.4534	0.0949	0.0192
VII	0.9609	0.2206	0.0456
VIII	1.8105	0.4961	0.1073
IX	2.8762	1.0405	0.2487
X	3.8183	1.9268	0.5551
XI	4.4259	2.9967	1.1477
XII	4.7422	3.9057	2.0775

- Muros prefabricados de hormigón armado (Figura 35)

El edificio pertenece a la *Escola Salvador Espriu*, escuela pública de educación infantil y primaria. Está ubicada en la *Av. Mediterrania s/n*, del municipio de *Vidreres*, en la

comarca *Selva*. Es un edificio construido en 2012 de dos plantas y con un índice básico medio de vulnerabilidad de 0.484.



Figura 35. Edificio de muros prefabricados de hormigón armado de la *Escola Salvador Espriu* (*Street View Google*, 2012).

En la Figura 36 se muestran las curvas de vulnerabilidad acumulativa (izquierda) y no acumulativa (derecha) para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado. Además, en la Tabla 26 se muestran los valores numéricos del índice de vulnerabilidad para las probabilidades de excedencia 95%, 50% y 5%.

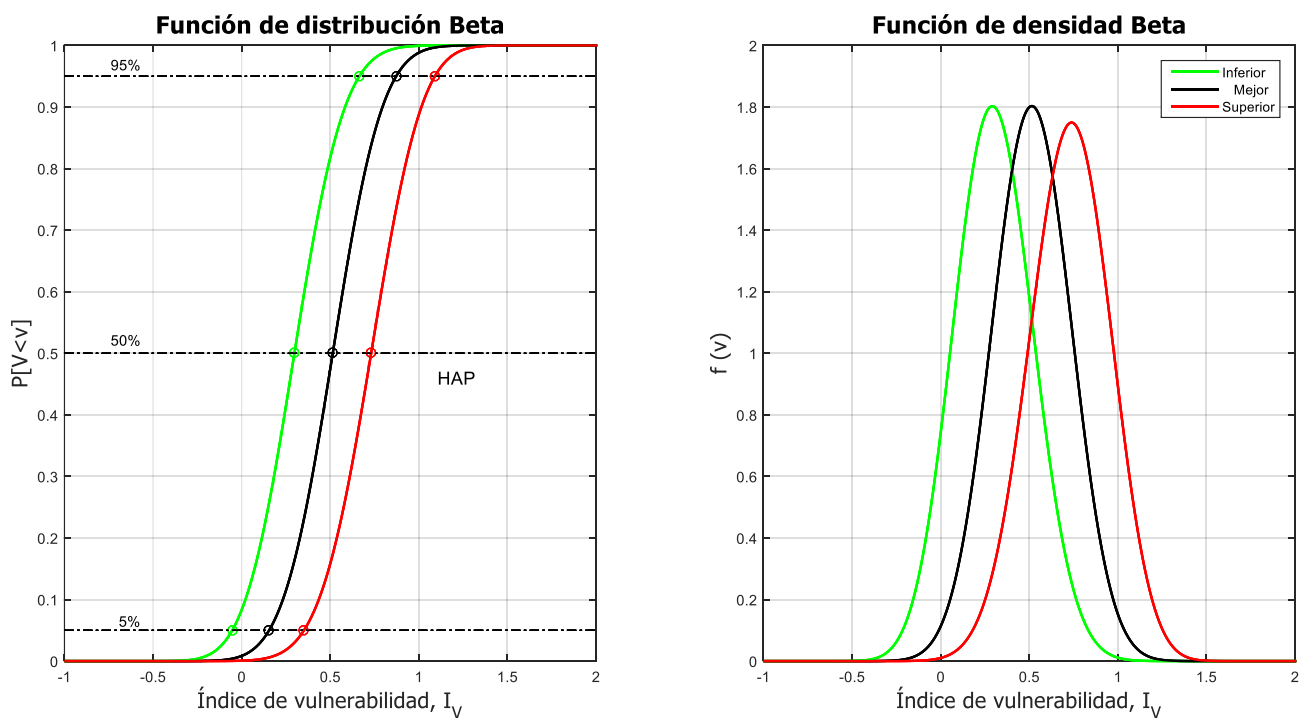


Figura 36. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.

En la Figura 37 se muestran las funciones de daño para un rango de intensidades que va desde VI hasta XII. En la Tabla 27 se muestran los valores del índice de daño para cada una de las intensidades (VI-XII) y para los percentiles 95, 50 y 5 para la curva mejor de vulnerabilidad.

Tabla 26. Índices de vulnerabilidad para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.

	95%	50%	5%
Curva inferior	0.6645	0.2977	-0.0532
Curva mejor	0.8723	0.5142	0.1550
Curva superior	1.0907	0.7310	0.3518

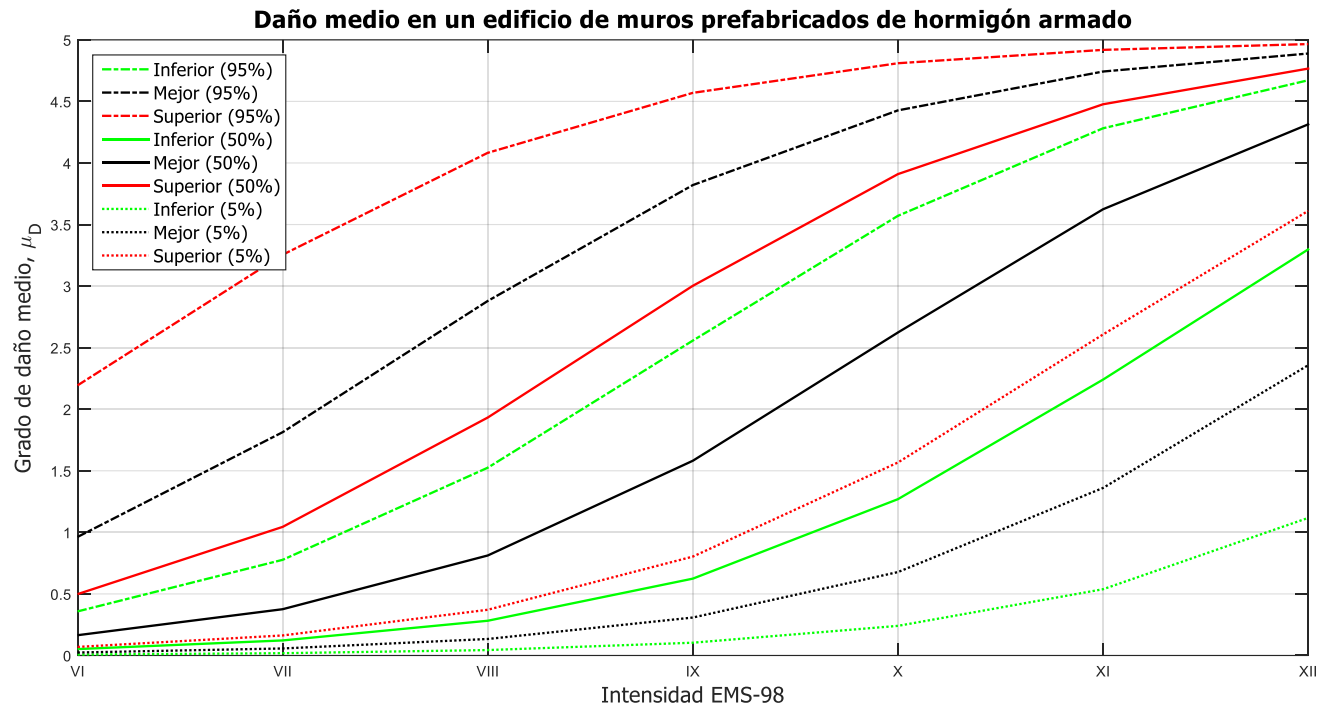


Figura 37. Curvas de daño para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.

Tabla 27. Índices de daño medio para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.

	Percentil 95	Percentil 50	Percentil 5
VI	0.9630	0.1647	0.0241
VII	1.8136	0.3759	0.0570
VIII	2.8795	0.8122	0.1340
IX	3.8207	1.5817	0.3082
X	4.4273	2.6235	0.6775
XI	4.7428	3.6241	1.3608
XII	4.8889	4.3136	2.3575

- Mampostería con forjado desconocido (Figura 38)

El edificio pertenece a la *Escola Baldiri Reixac*, escuela pública de educación infantil y primaria. Está ubicada en la *C. Alfons XII 80*, del municipio de *Banyoles*, en la comarca *Pla de l'Estany*. Es un edificio construido en 1958 de dos plantas y con un índice básico medio de vulnerabilidad de 0.74.



Figura 38. Edificio de mampostería con forjado desconocido de la *Escola Baldiri Reixac* (Casado, 2012).

En la Figura 39 se muestran las curvas de vulnerabilidad acumulativa (izquierda) y no acumulativa (derecha) para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado. Además, en la Tabla 28 se muestran los valores numéricos del índice de vulnerabilidad para las probabilidades de excedencia 95%, 50% y 5%.

Tabla 28. Índices de vulnerabilidad para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.

	95%	50%	5%
Curva inferior	0.8095	0.5385	0.2659
Curva mejor	0.9689	0.7017	0.4254
Curva superior	1.1281	0.8649	0.5846

En la Figura 40 se muestran las funciones de daño para un rango de intensidades que va desde VI hasta XII. En la Tabla 29 se muestran los valores del índice de daño para cada una de las intensidades (VI-XII) y para los percentiles 95, 50 y 5 para la curva mejor de vulnerabilidad.

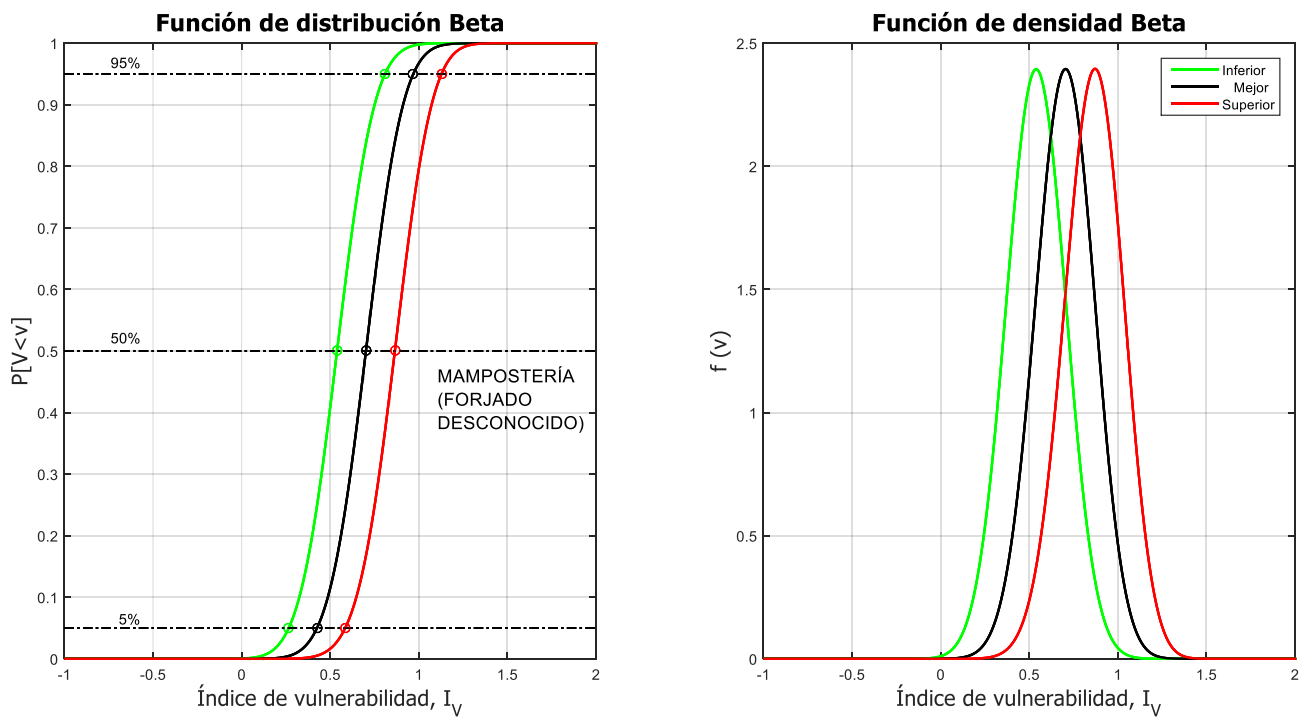


Figura 39. Curvas de vulnerabilidad para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.

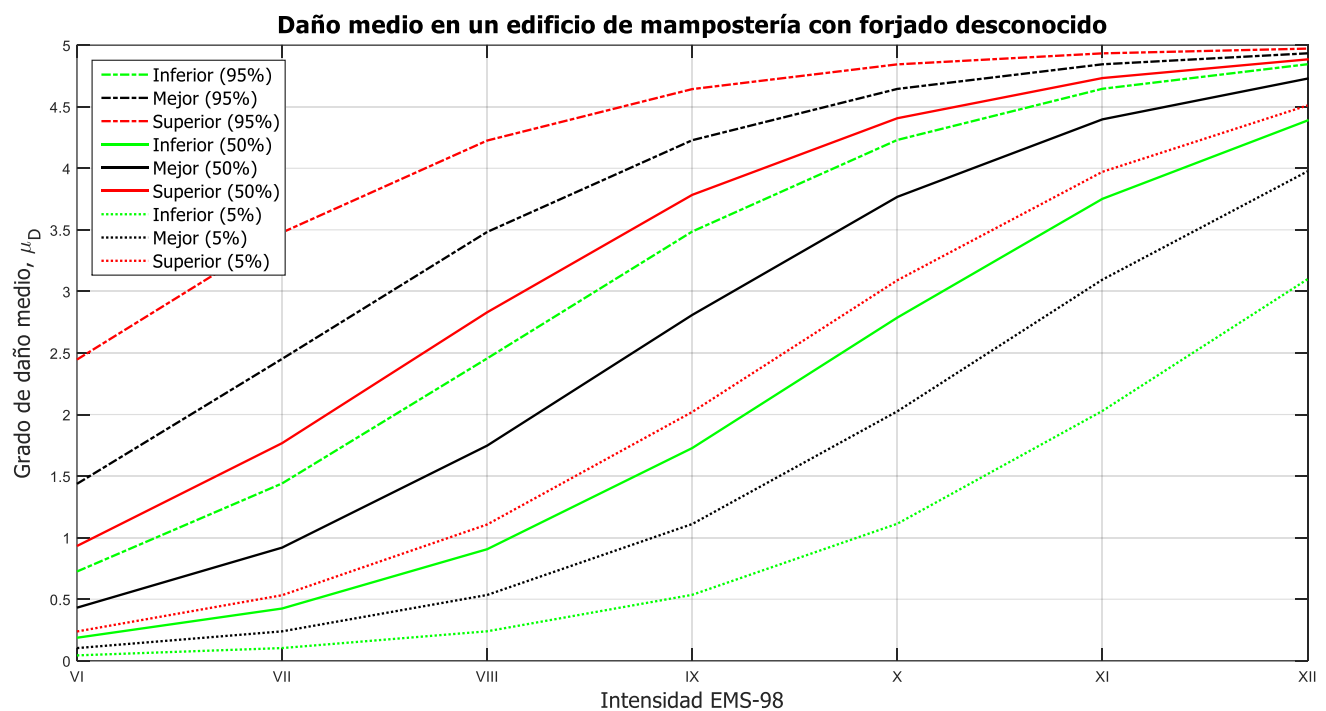


Figura 40. Curvas de daño para un edificio de tipo muros prefabricados de hormigón armado.

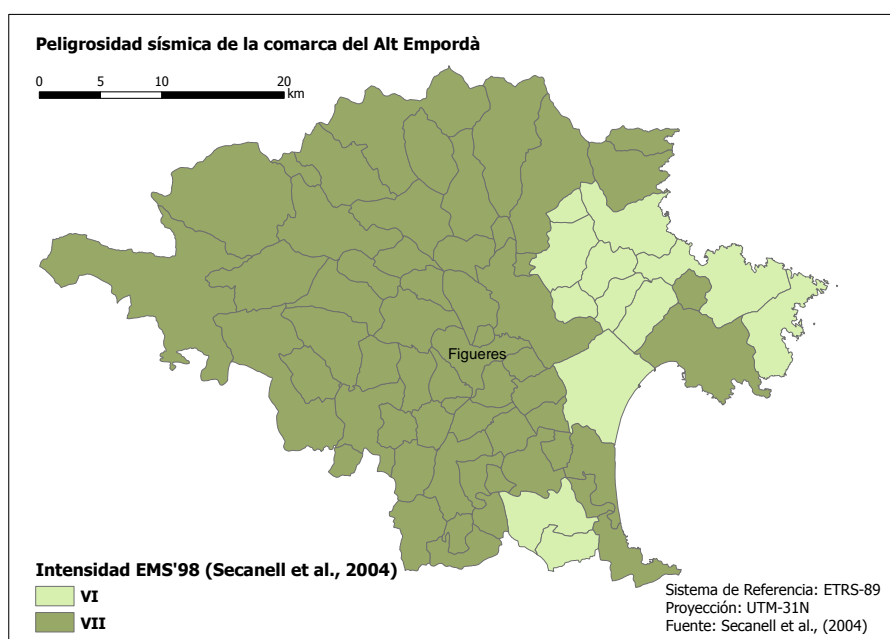
Tabla 29. Índices de daño medio para un edificio de muros prefabricados de hormigón armado.

	Percentil 95	Percentil 50	Percentil 5
VI	1.4369	0.4312	0.1030
VII	2.4518	0.9190	0.2389
VIII	3.4828	1.7475	0.5345
IX	4.2280	2.8089	1.1107
X	4.6446	3.7680	2.0262
XI	4.8446	4.3974	3.0957
XII	4.9337	4.7284	3.9751

4.1.3. APLICACIÓN A NIVEL COMARCAL

COMARCA DEL *ALT EMPORDÀ*

En este apartado se muestran los escenarios de daño sísmico generados para la comarca del *Alt Empordà* (Figuras 42, 43, 44, 45, 46 y 47). En las seis figuras se incluye una ampliación para el municipio de *Figuères* (municipio con más escuelas) para facilitar la interpretación de los resultados. Los mapas se representan con una división administrativa a nivel municipio. Los índices de daño mostrados en los mapas son los obtenidos para intensidades VI y VII (curva mejor), pues según Secanell y otros autores (2004) son las intensidades que se dan en la dicha comarca (Figura 41). Para cada intensidad se muestran los resultados del percentil 95, 50 y 5.

**Figura 41.** Peligrosidad sísmica de la comarca del *Alt Empordà*.

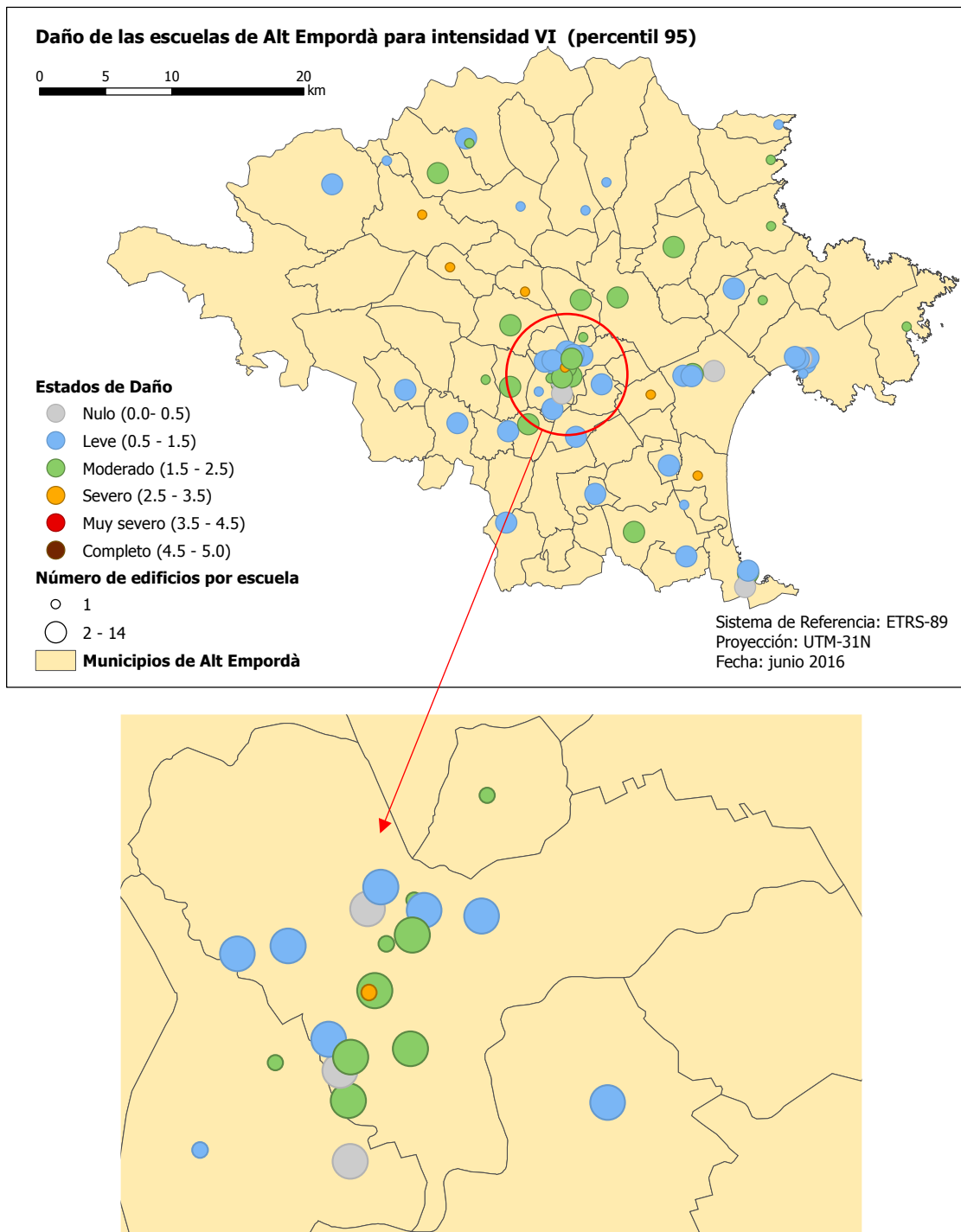


Figura 42. Escenario de daño para la comarca *Alt Empordà* para el percentil 95 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de *Figueras*.

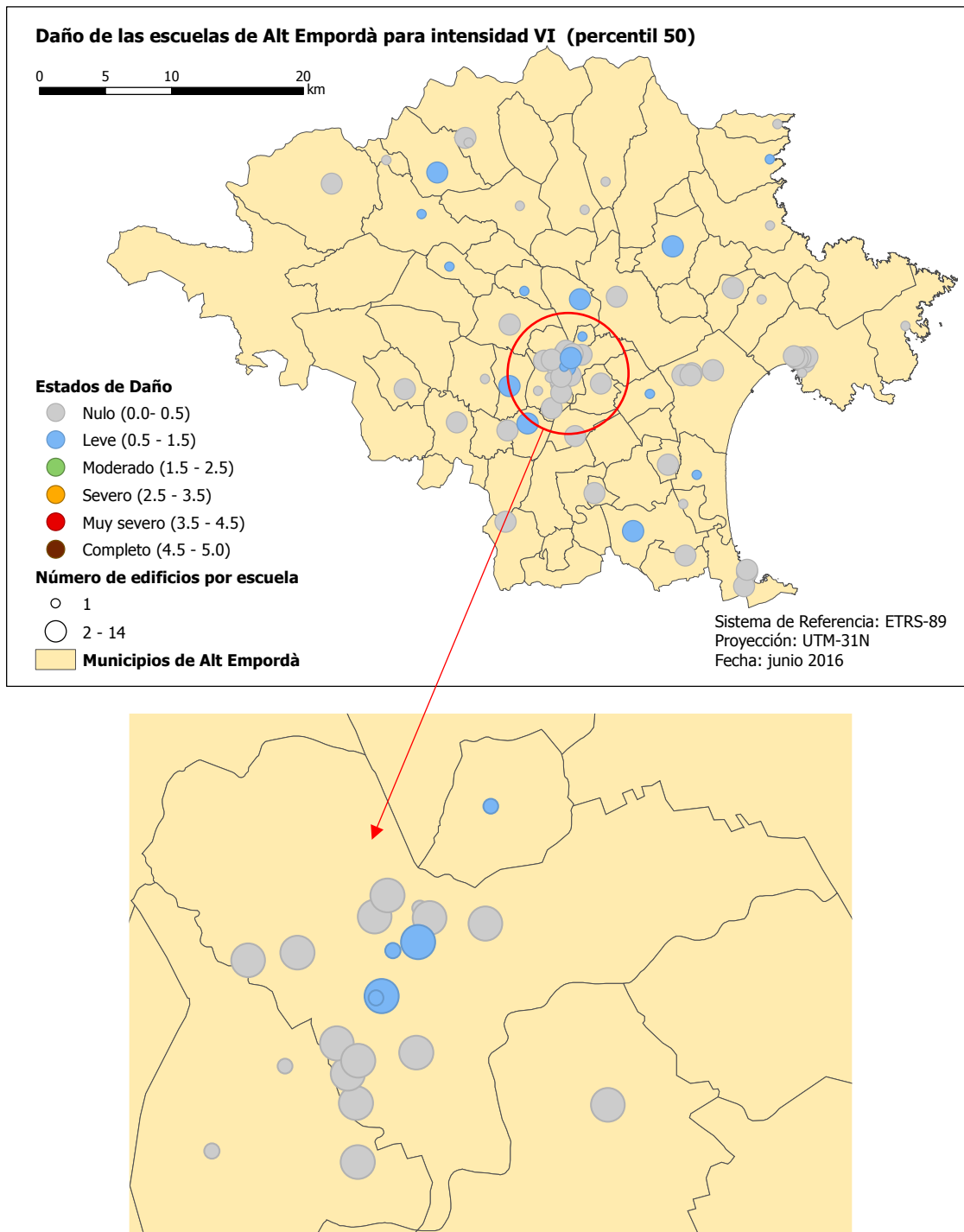


Figura 43. Escenario de daño para la comarca *Alt Empordà* para el percentil 50 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de *Figueras*.

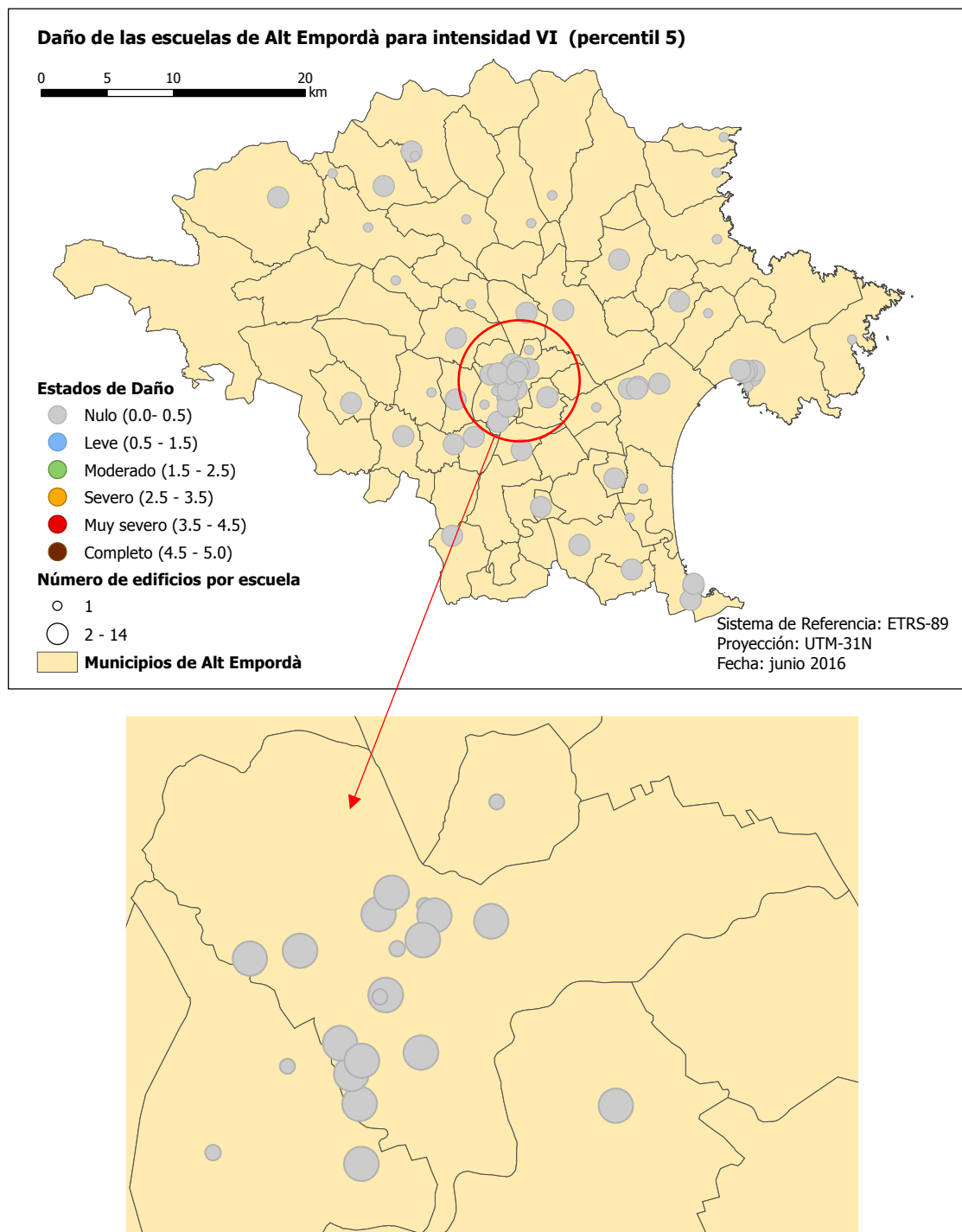


Figura 44. Escenario de daño para la comarca *Alt Empordà* para el percentil 5 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de *Figueras*.

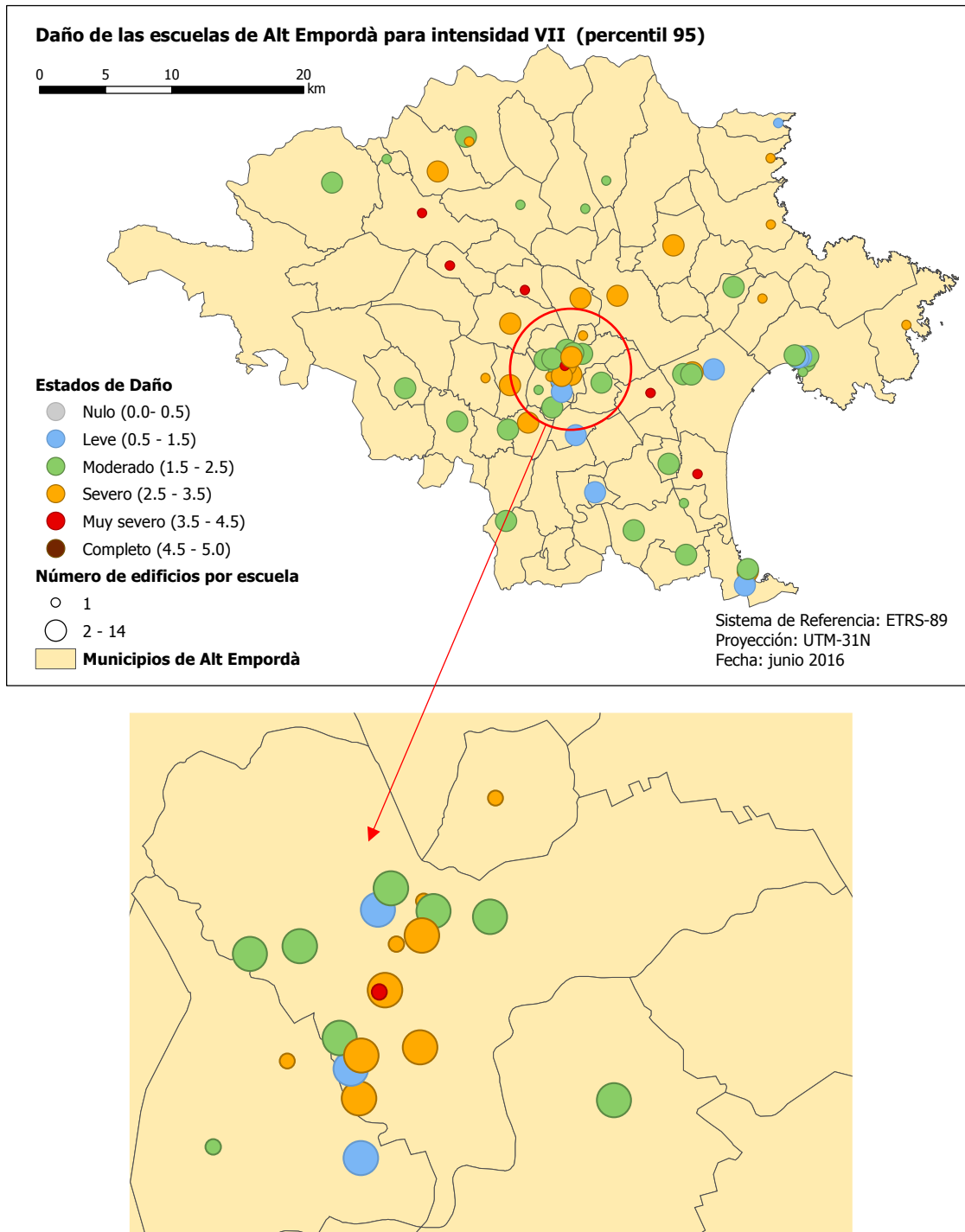


Figura 45. Escenario de daño para la comarca *Alt Empordà* para el percentil 95 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de *Figueras*.

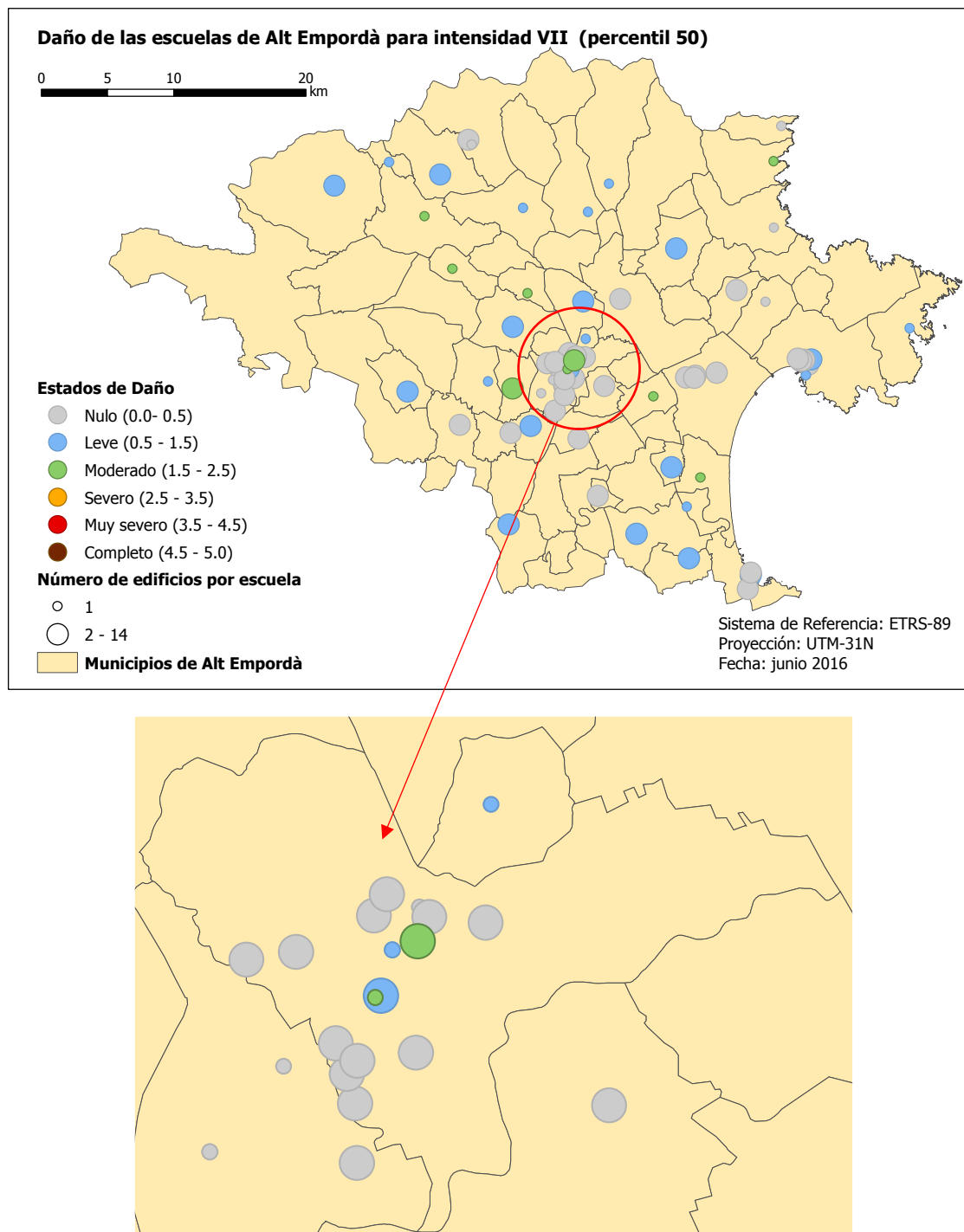


Figura 46. Escenario de daño para la comarca *Alt Empordà* para el percentil 50 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de *Figueras*.

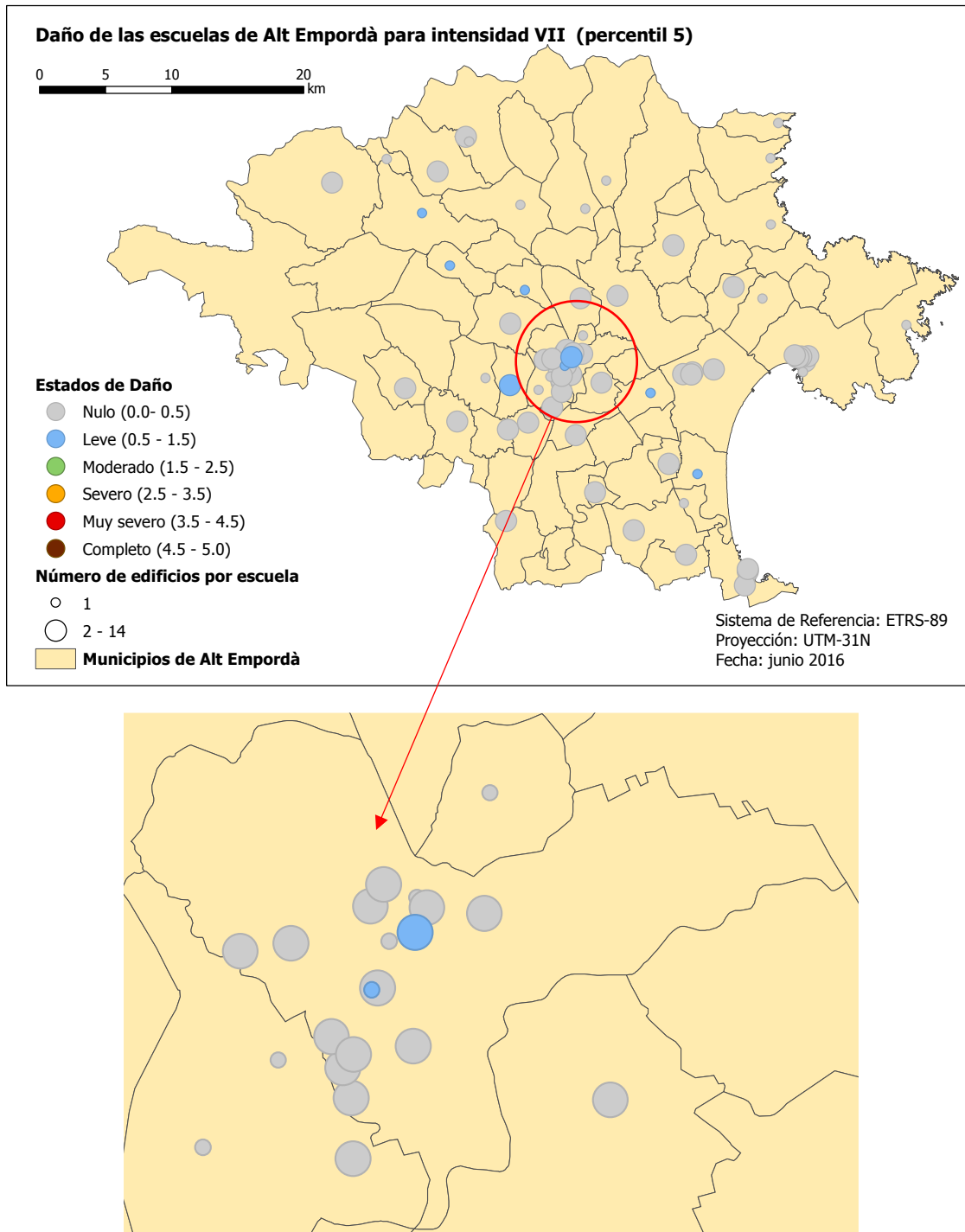


Figura 47. Escenario de daño para la comarca *Alt Empordà* para el percentil 5 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de *Figueras*.

COMARCA DEL *GIRONÈS*

En este apartado se muestran los escenarios de daño sísmico generados para la comarca del *Gironès* (Figuras 49, 50, 51, 52, 53 y 54). Los mapas se representan con una división administrativa a nivel municipio. Los índices de daño mostrados en los mapas son los obtenidos para intensidades VI y VII (curva mejor), pues según Secanell y otros autores (2004) son las intensidades que se dan en la dicha comarca (Figura 48). Para cada intensidad se muestran los resultados del percentil 95, 50 y 5.

En las seis figuras se incluye una ampliación para el municipio de *Girona* (municipio con más escuelas) para facilitar la interpretación de los resultados.

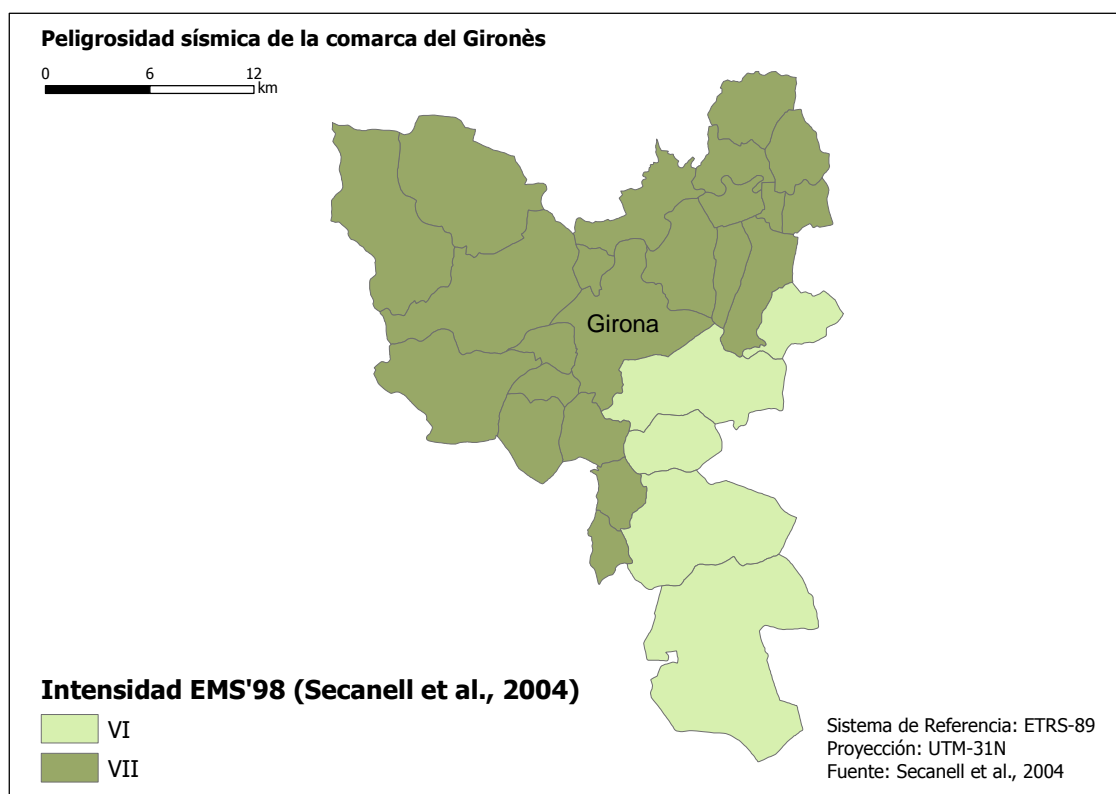


Figura 48. Peligrosidad sísmica de la comarca del *Gironès*.

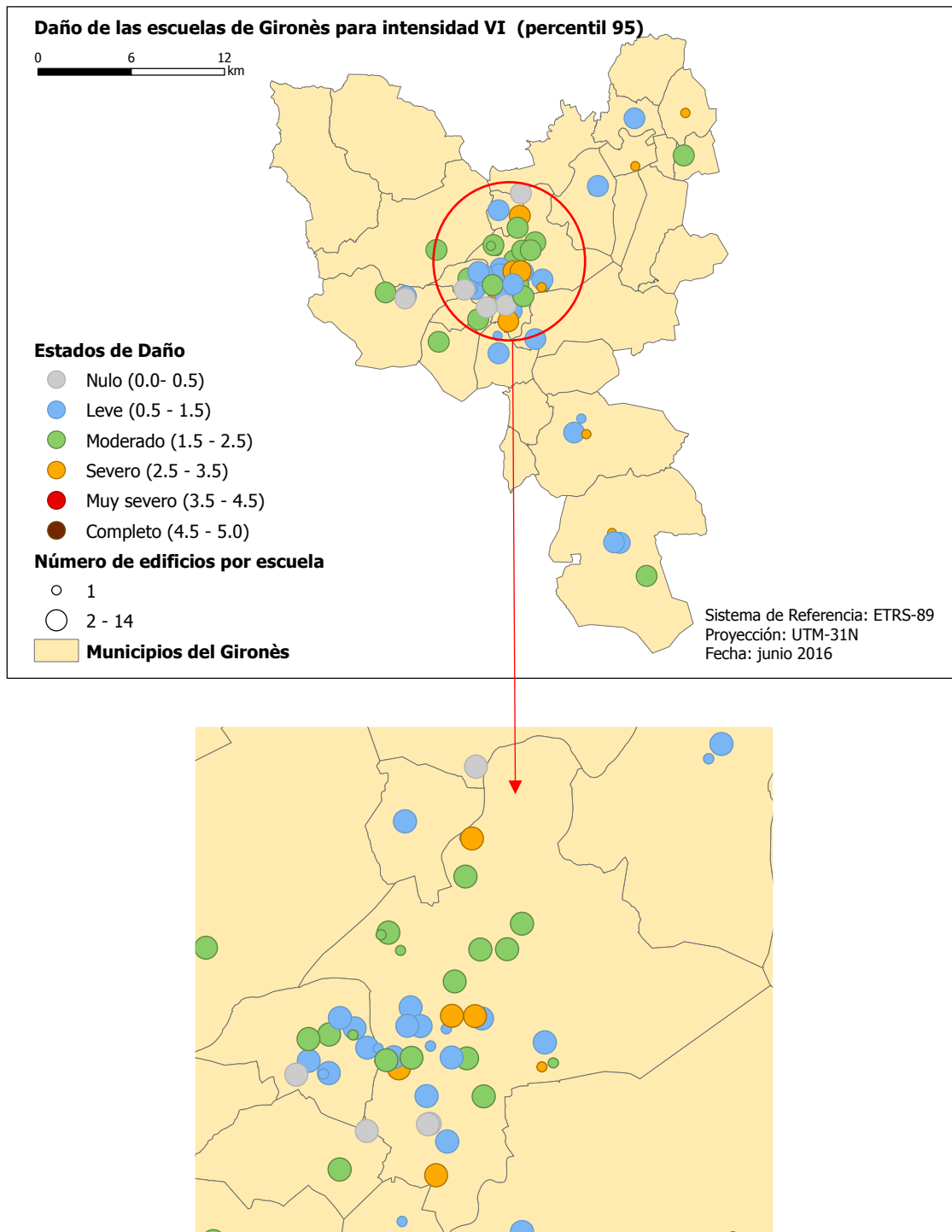


Figura 49. Escenario de daño para la comarca del *Gironès* para el percentil 95 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de *Girona*.

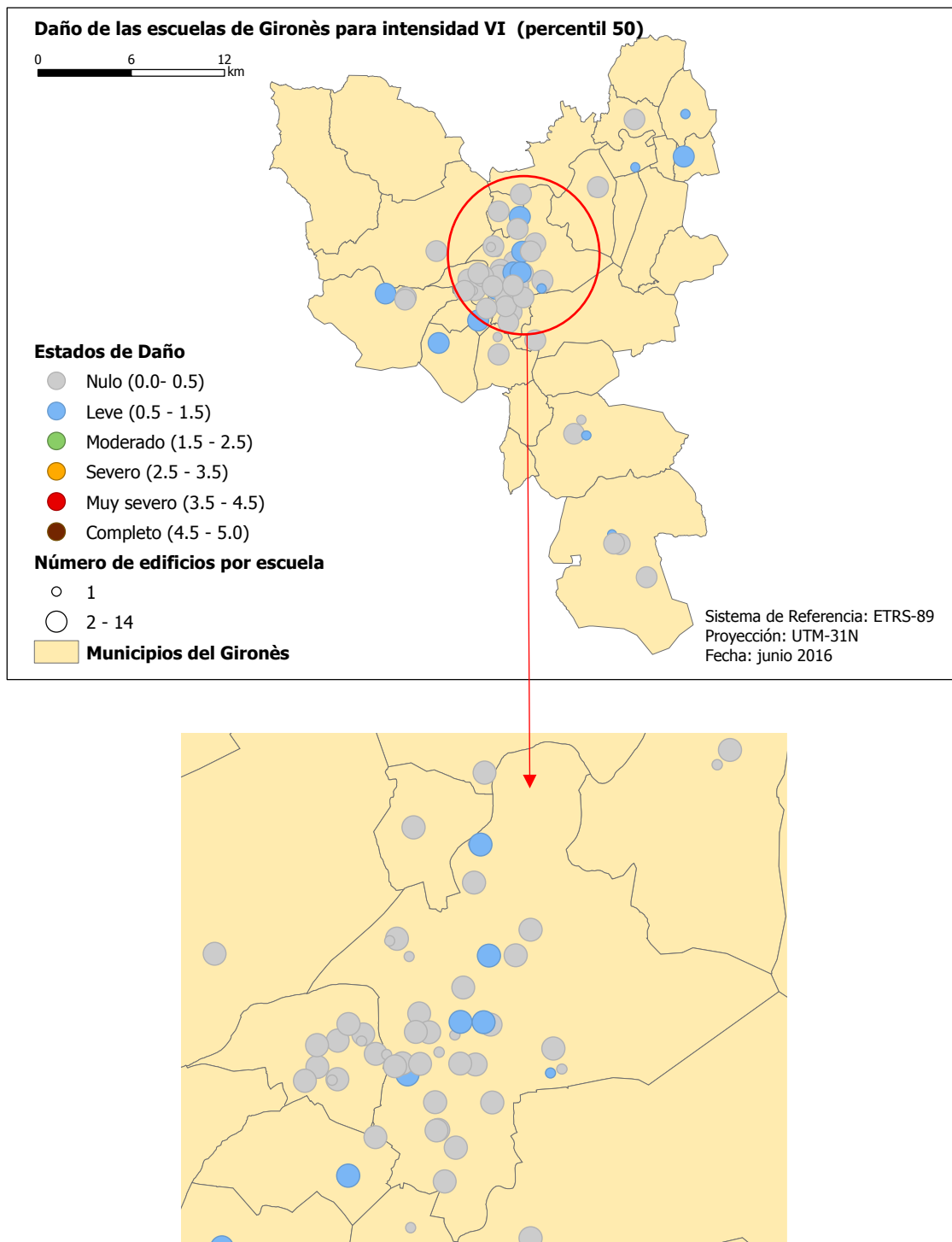


Figura 50. Escenario de daño para la comarca del *Gironès* para el percentil 50 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de *Girona*.

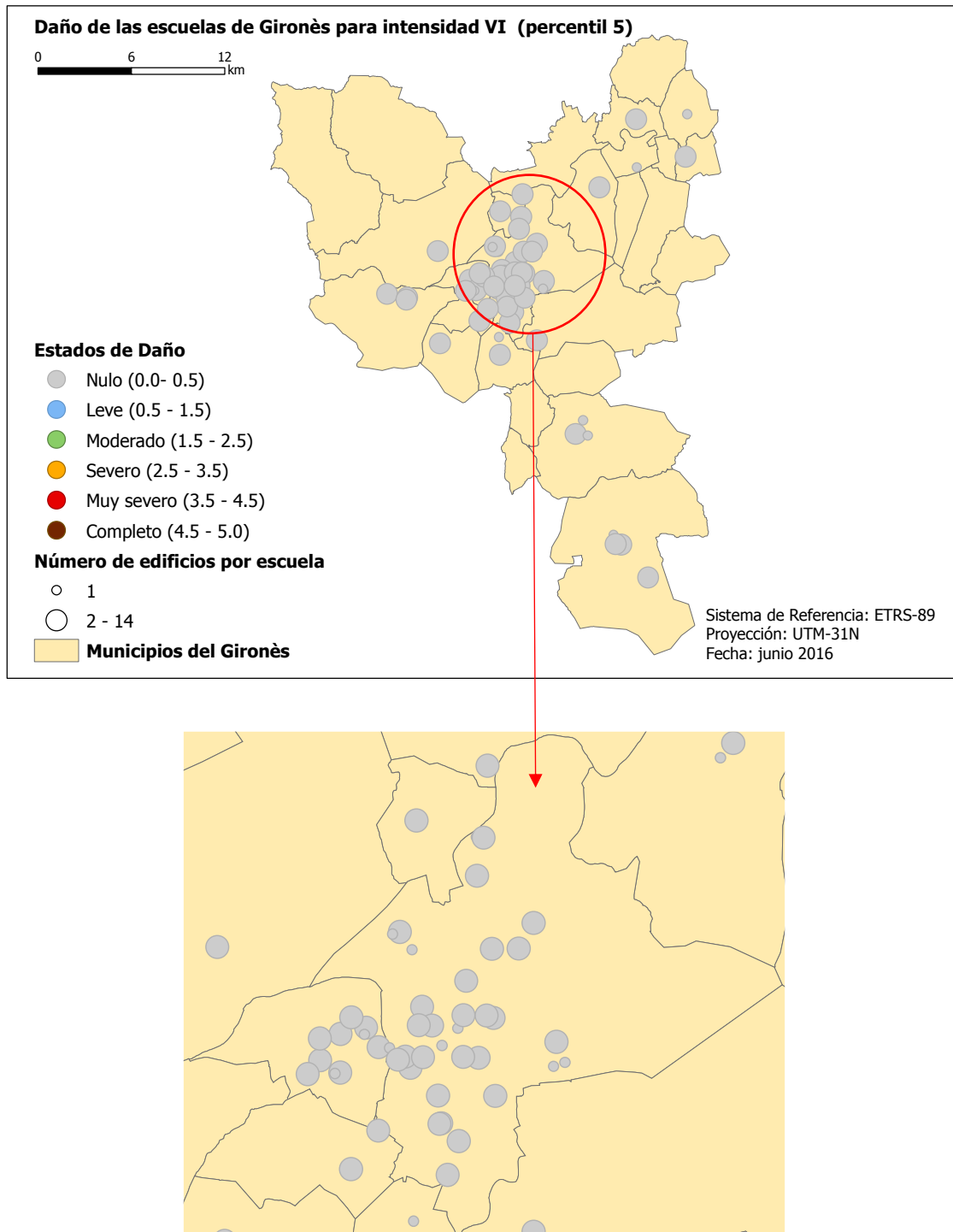
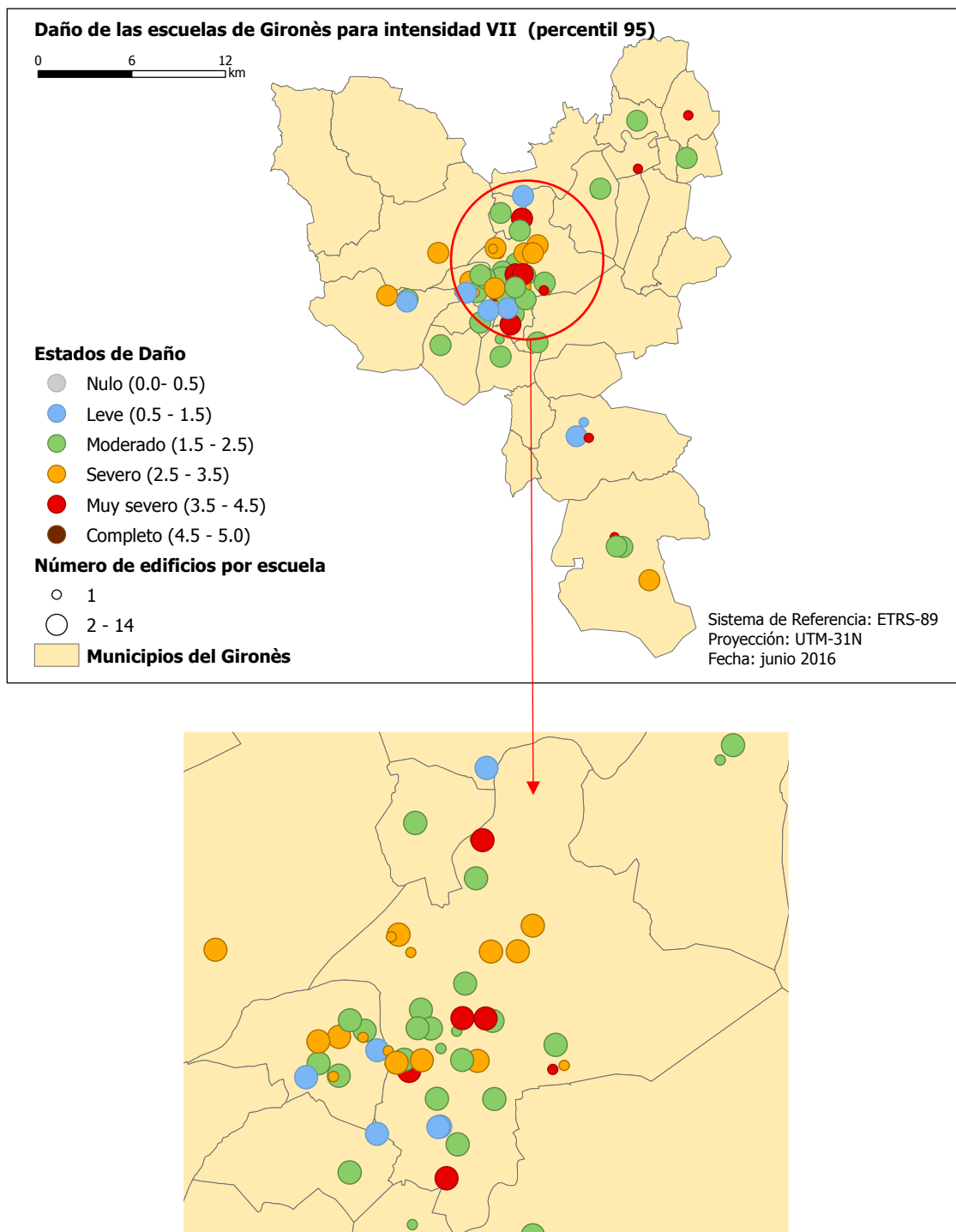


Figura 51. Escenario de daño para la comarca del *Gironès* para el percentil 5 e intensidad VI. El zoom se corresponde con el municipio de *Girona*.



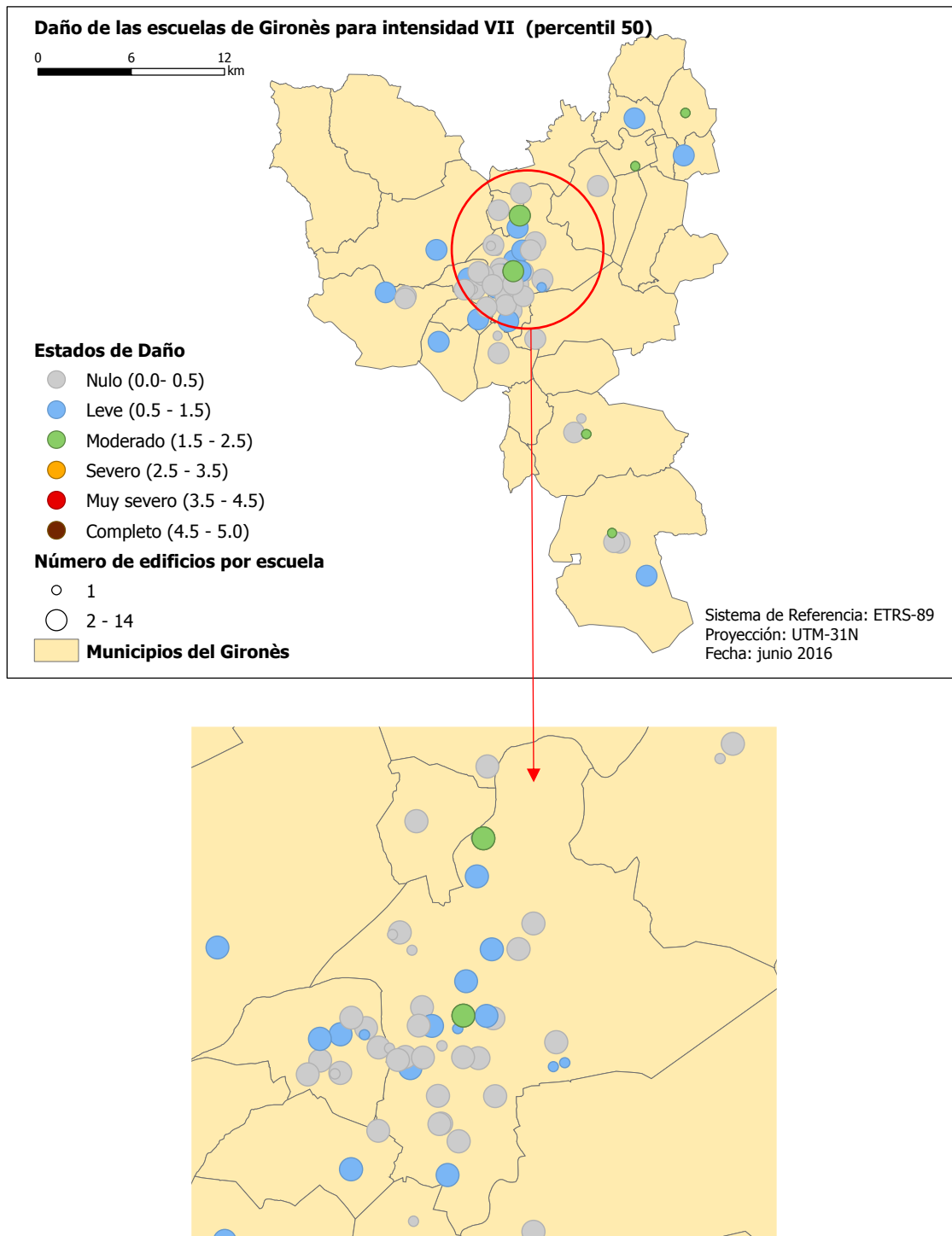


Figura 53. Escenario de daño para la comarca del *Gironès*, para el percentil 50 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de *Girona*.

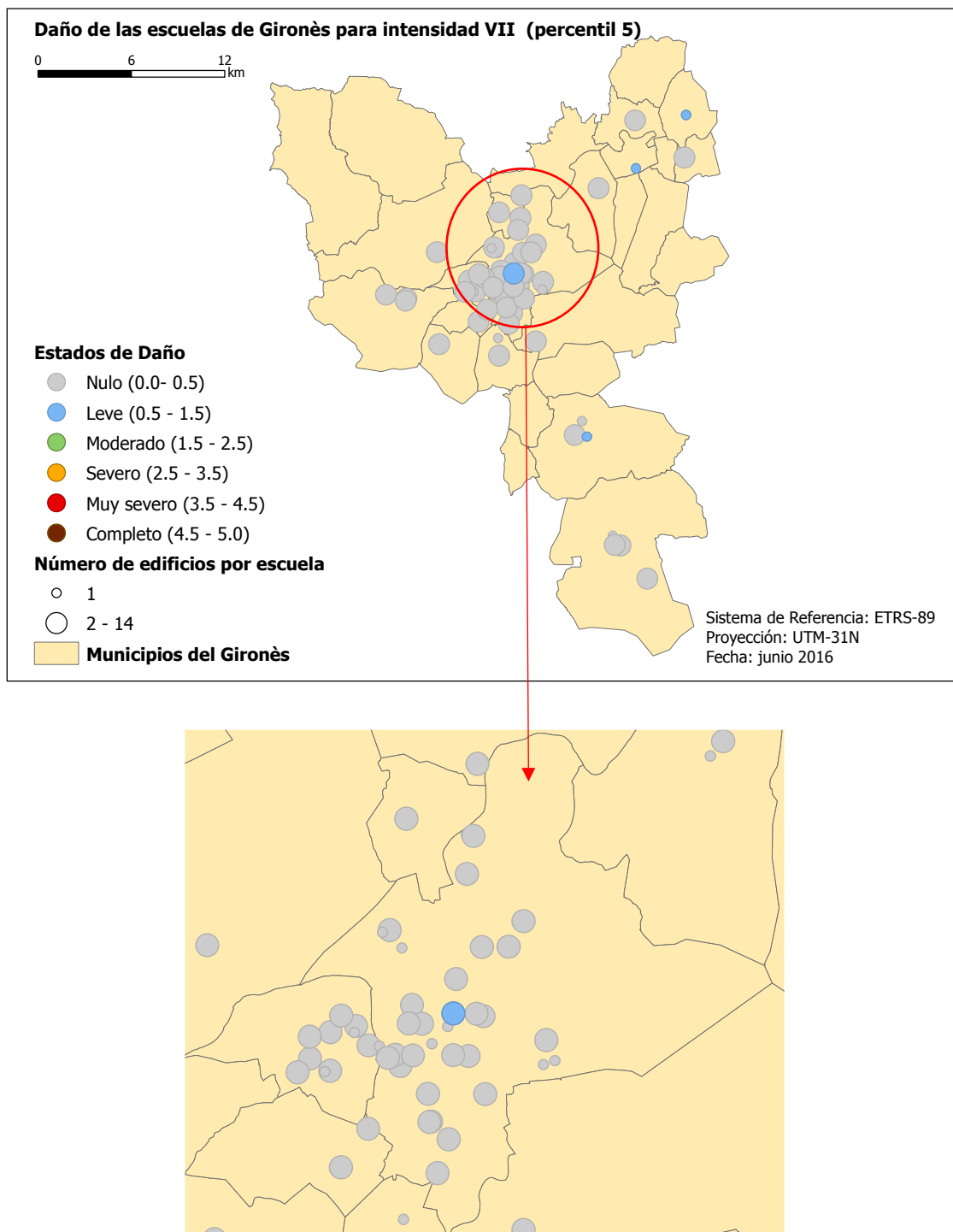


Figura 54. Escenario de daño para la comarca del *Gironès*, para el percentil 5 e intensidad VII. El zoom se corresponde con el municipio de *Girona*.

4.1.4. APLICACIÓN A NIVEL PROVINCIAL

En este apartado se incluyen los escenarios de daño sísmico generados para la provincia de *Girona* (Figuras 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62 y 63). En los mapas se muestra una división administrativa por comarcas. Los índices de daño representados son los obtenidos para intensidades VI, VII y VIII (curva mejor), pues según Secanell y otros autores (2004) son las intensidades que se dan en la dicha comarca (Figura 7). Para cada intensidad se muestran los resultados del percentil 95, 50 y 5.

PERCENTIL 95

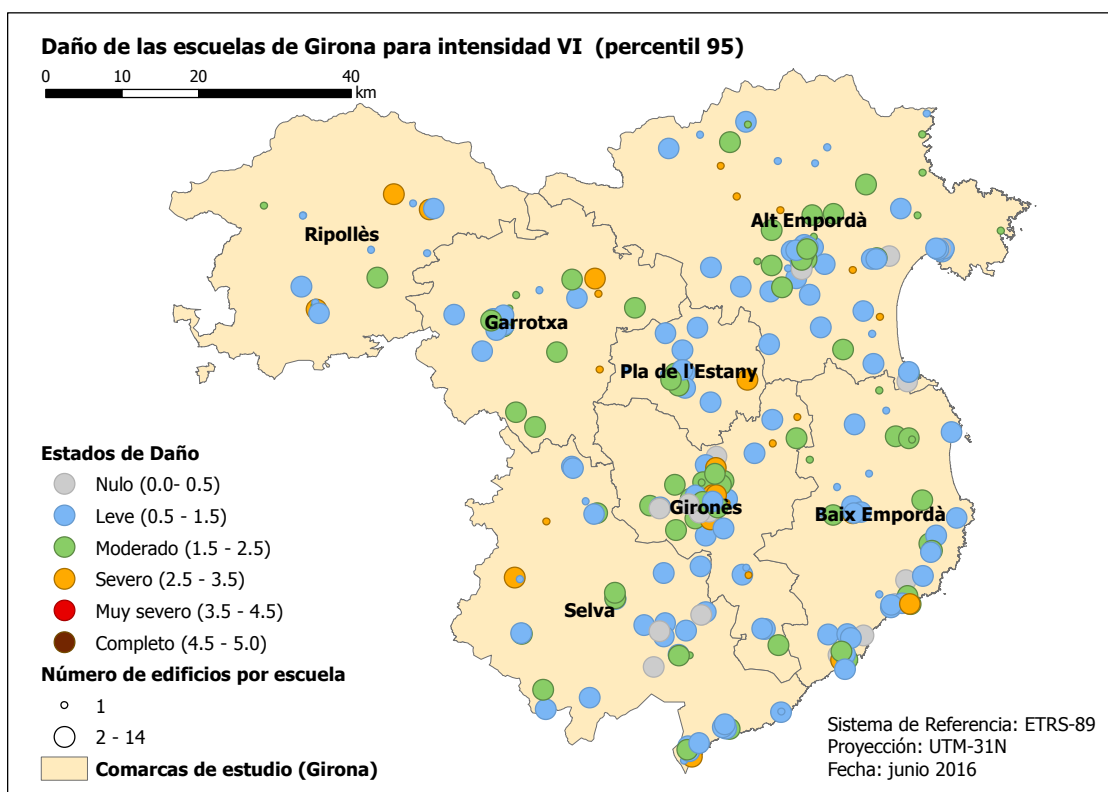


Figura 55. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 95 e intensidad VI.

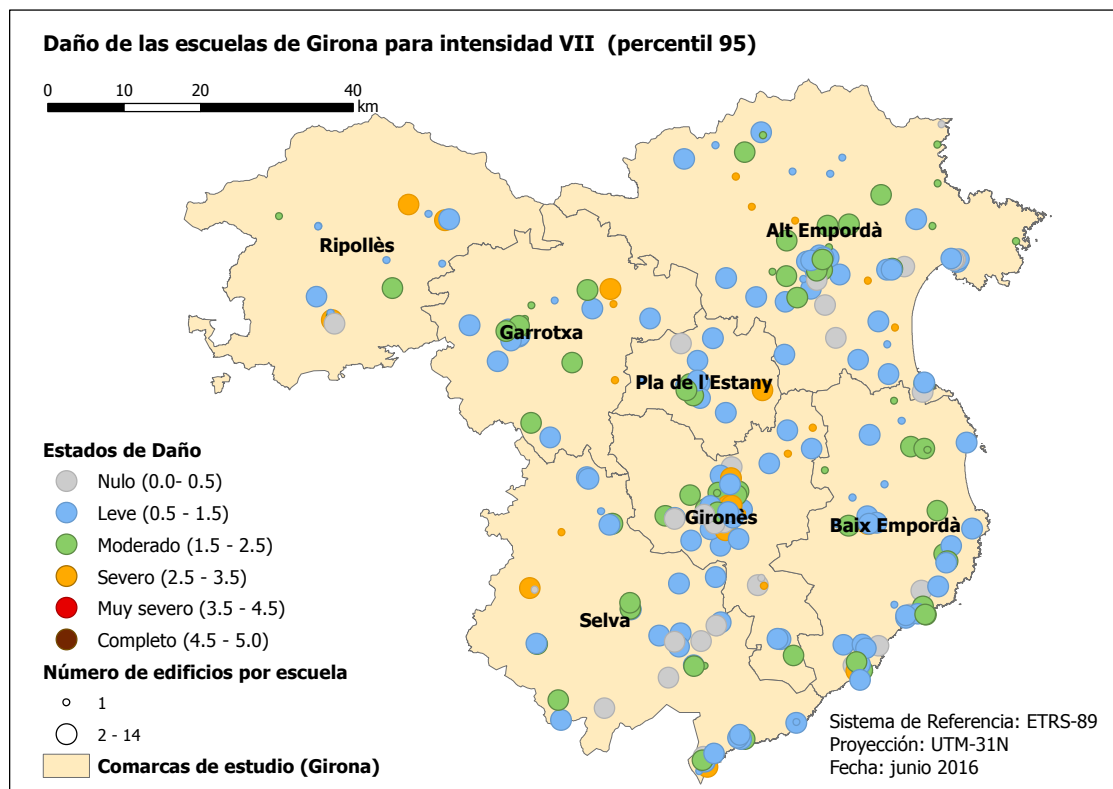


Figura 56. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 95 e intensidad VII.

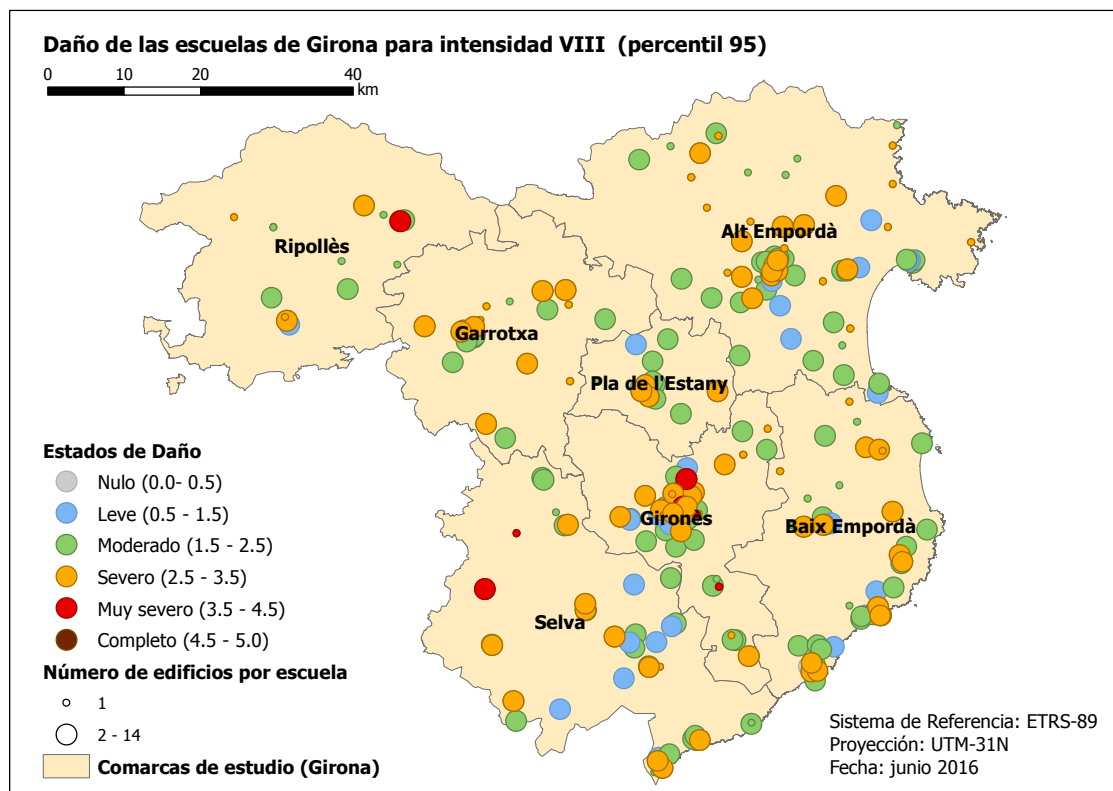


Figura 57. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 95 e intensidad VIII.

PERCENTIL 50

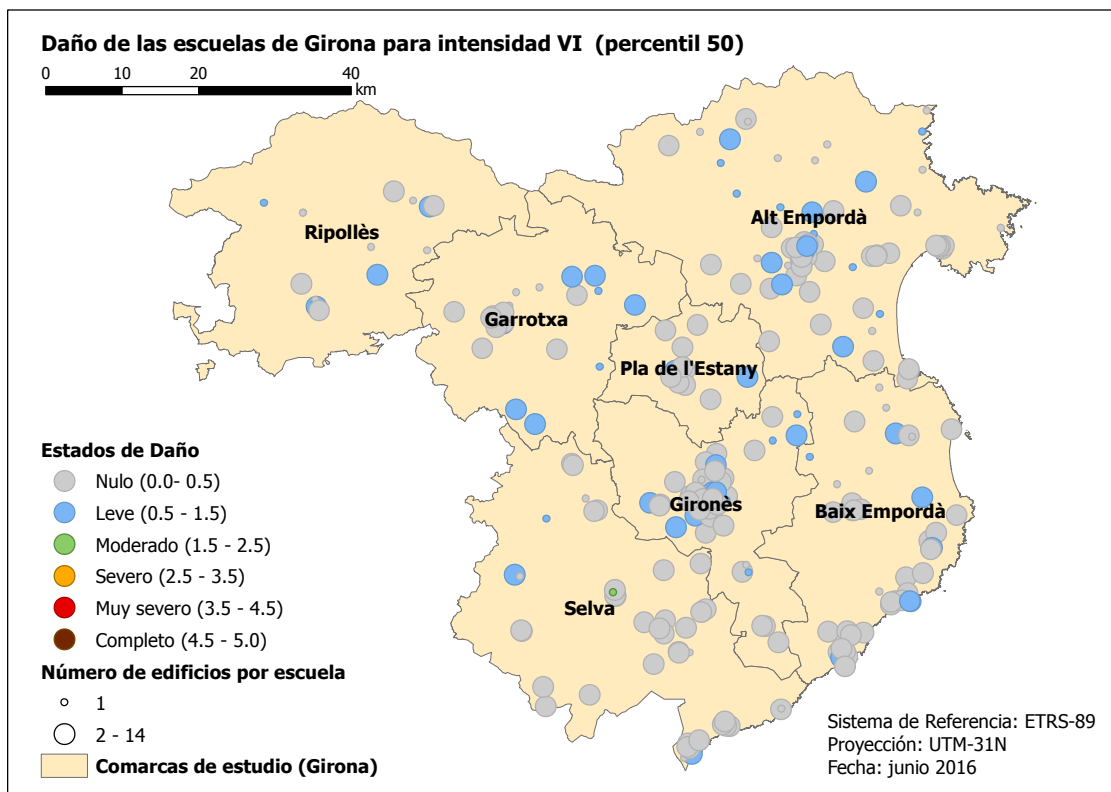


Figura 58. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 50 e intensidad VI.

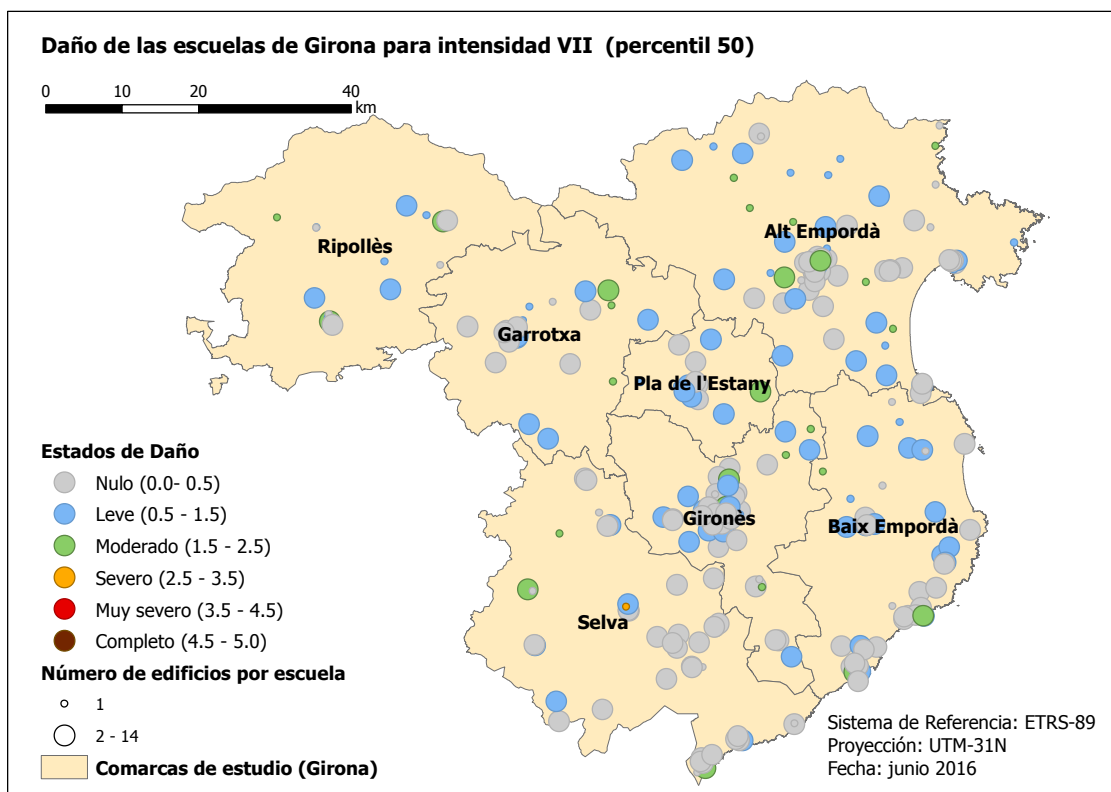


Figura 59. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 50 e intensidad VII.

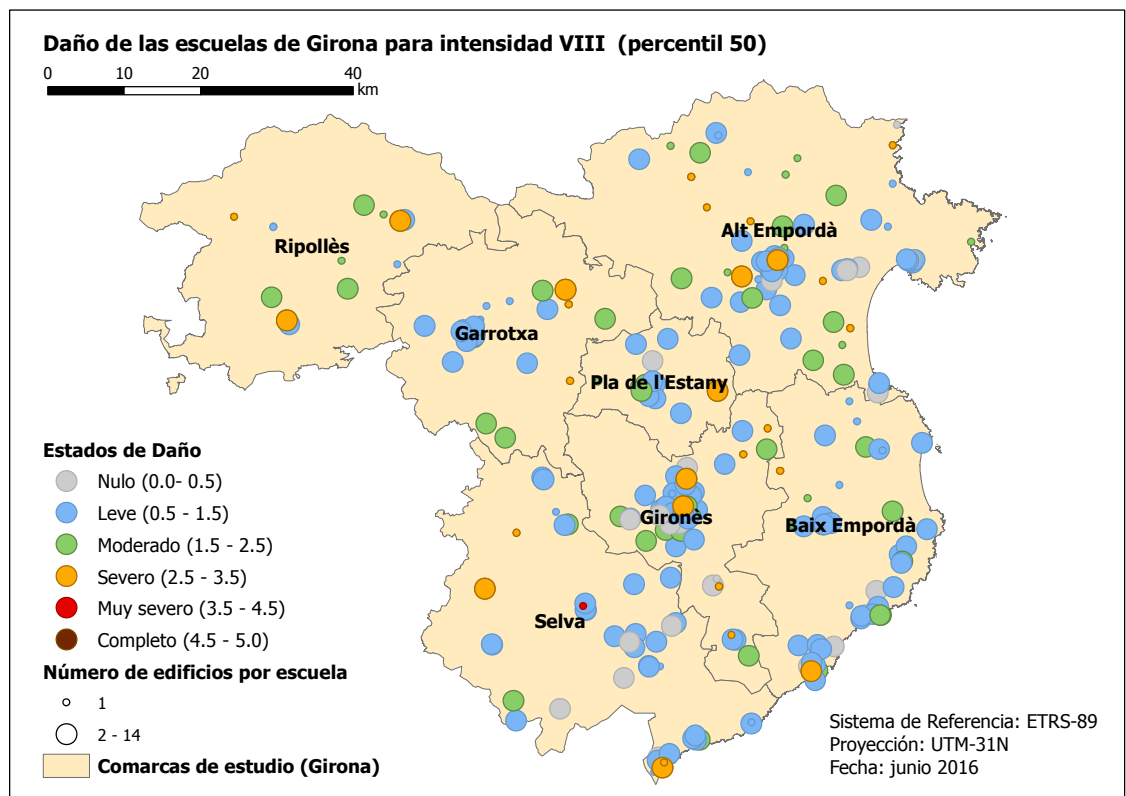


Figura 60. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 50 e intensidad VIII.

PERCENTIL 5

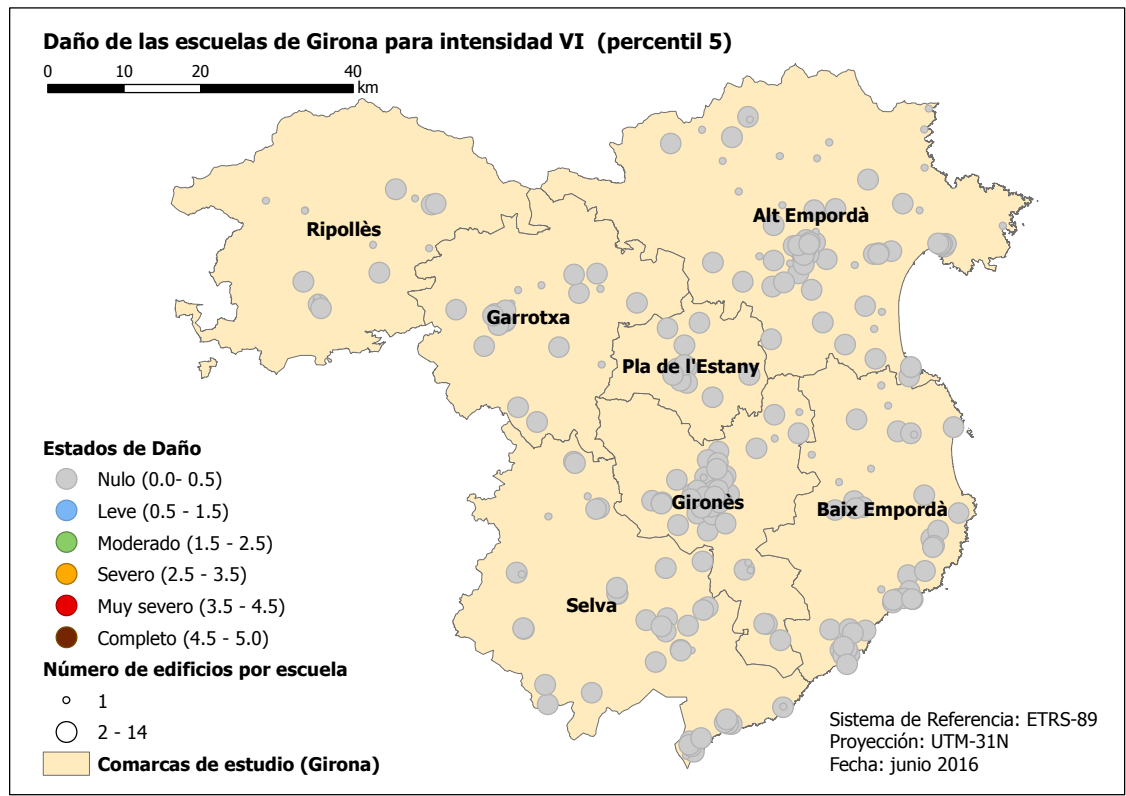


Figura 61. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 5 e intensidad VI.

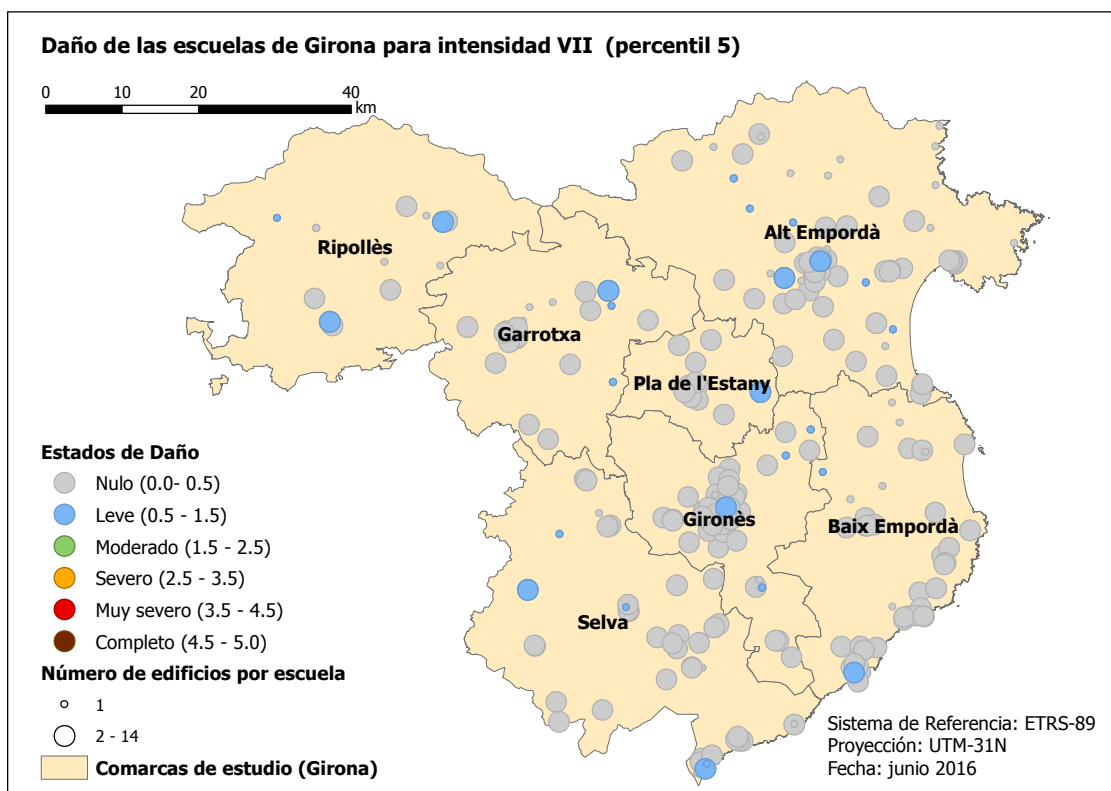


Figura 62. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 50 e intensidad VII.

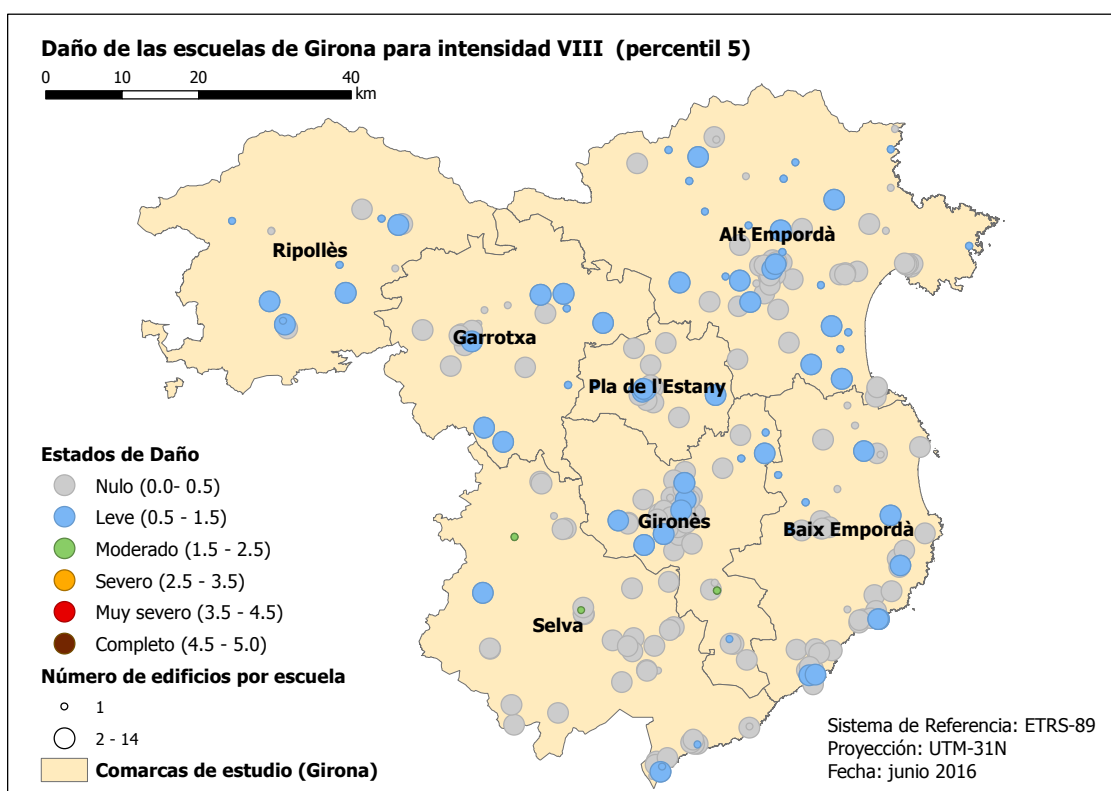


Figura 63. Escenario de daño para la provincia de *Girona* para el percentil 50 e intensidad VIII.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

El valor más probable del índice de vulnerabilidad básico para el edificio de mampostería que se ha empleado como ejemplo es 0.873 y el obtenido tras realizar el análisis es 0.835 (mejor curva y 50% de probabilidad de excedencia). Para el edificio de hormigón armado el índice básico es de 0.442 y tras el análisis se obtiene un índice de vulnerabilidad de 0.439 (mejor curva y 50% de probabilidad de excedencia). Por último, el edificio de acero tiene un índice de vulnerabilidad básico asociado de 0.363 y tras el análisis el índice obtenido es 0.442 (mejor curva y 50% de probabilidad de excedencia).

El programa USERISK considera como índice de vulnerabilidad básico, para cada una de las tipologías, los que se muestran en la Tabla 2 (parámetro $V_{I,BTM}^*$). Al realizar el análisis de vulnerabilidad aplica los modificadores regionales y de comportamiento a cada índice básico y proporciona un nuevo índice de vulnerabilidad. Este nuevo índice caracteriza la vulnerabilidad del edificio atendiendo a sus propiedades geométricas y de localización.

Tanto para mampostería como para hormigón armado los modificadores aplicados bonifican la vulnerabilidad del edificio. Sin embargo, para el edificio de acero éstos penalizan la vulnerabilidad.

Por otro lado, para las tipologías no estándar, el valor más probable del índice de vulnerabilidad básico para el barracón es 0.451 y el obtenido tras realizar el análisis es 0.41 (mejor curva y 50% de probabilidad de excedencia). Para el edificio de muros prefabricados de hormigón armado el índice básico es de 0.484 y tras el análisis se obtiene un índice de vulnerabilidad de 0.514 (mejor curva y 50% de probabilidad de excedencia). Por último, el edificio de mampostería con forjado desconocido tiene un índice de vulnerabilidad básico asociado de 0.74 y tras el análisis el índice obtenido es de 0.70 (mejor curva y 50% de probabilidad de excedencia). Tanto para el barracón como para mampostería los modificadores aplicados bonifican la vulnerabilidad del edificio. Sin embargo, para el edificio de muros prefabricados de hormigón armado éstos penalizan la vulnerabilidad.

En la Figura 64 se muestra el número de edificios que tienen asociado un valor determinado del índice de vulnerabilidad. Las líneas verticales indican el valor del índice de vulnerabilidad medio para cada una de las clases estructurales (mampostería, hormigón armado, acero, barracón, muros prefabricados de hormigón armado y mampostería con forjado desconocido). Los valores medios de las clases de mampostería, hormigón armado y acero se han obtenido como la media ponderada de los índices de vulnerabilidad básicos de las distintas tipologías de cada clase. La ponderación se ha llevado a cabo en función del número de edificios de cada tipología. En la Tabla 39 del Anexo A se muestran los valores numéricos empleados para el cálculo de las medias ponderadas.

El 55 % de los edificios que componen la base de datos tienen un índice de vulnerabilidad inferior a 0.5.

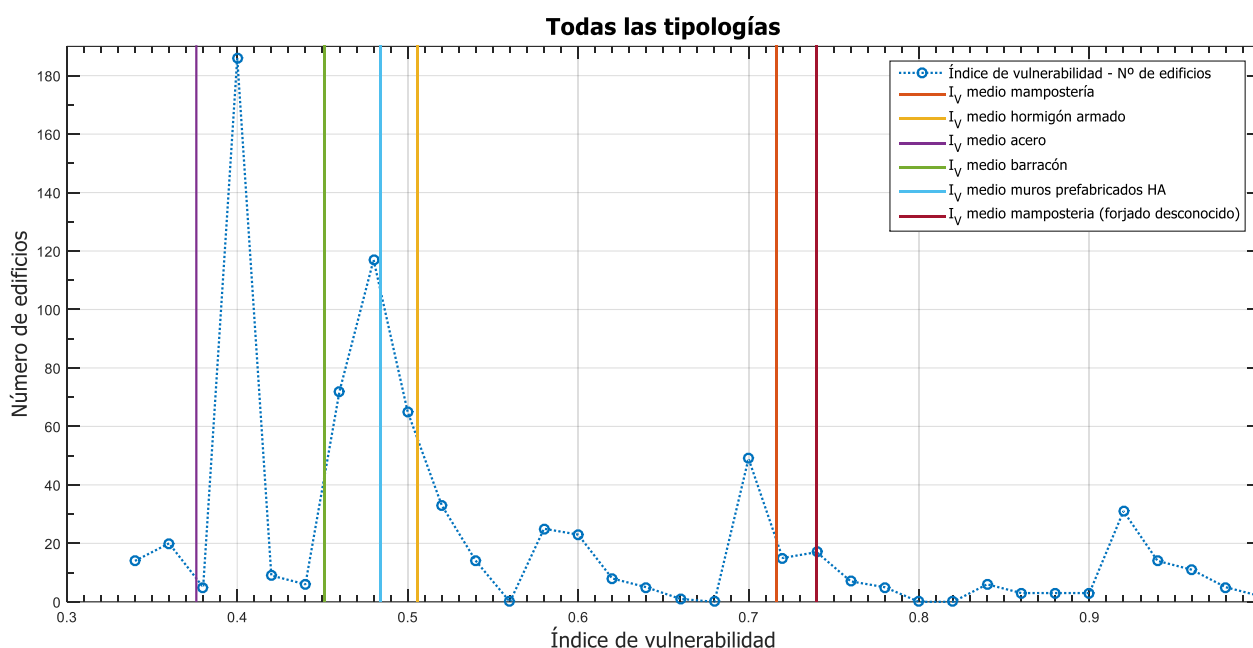


Figura 64. Número de edificios para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.

Las Figuras 65, 66, 67, 68, 69 y 70 muestran el número de edificios con un determinado índice de vulnerabilidad para cada una de las clases estructurales por separado: mampostería, hormigón armado, acero, barracón, muros prefabricados de hormigón armado y mampostería con forjado desconocido respectivamente.

En el caso de los barracones, los edificios de muros prefabricados de hormigón armado y de mampostería con forjado desconocido (tipologías no estándar) todos los edificios de cada tipología tienen asociado el mismo índice de vulnerabilidad. Los barracones tienen asociado un índice de vulnerabilidad de 0.4, los edificios de muros prefabricados de 0.5 y los de mampostería con forjado desconocido de 0.7.

El 100 % de los edificios de mampostería, de muros prefabricados de hormigón armado y de mampostería con forjado desconocido tienen un índice de vulnerabilidad superior o igual a 0.5. El 40 % de los edificios de hormigón armado tienen un índice de vulnerabilidad superior o igual a 0.5 y ningún barracón o edificio de acero tiene un índice de vulnerabilidad superior o igual a 0.5 (Tabla 40 del Anexo A).

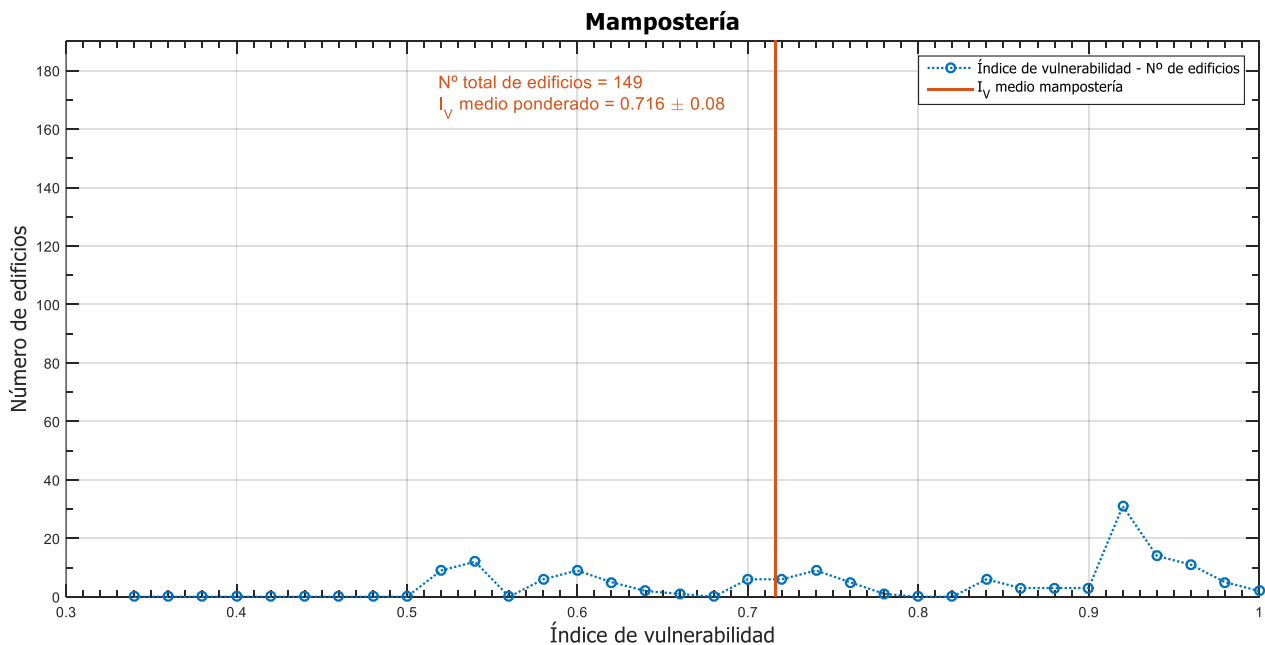


Figura 65. Número de edificios de mampostería para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.

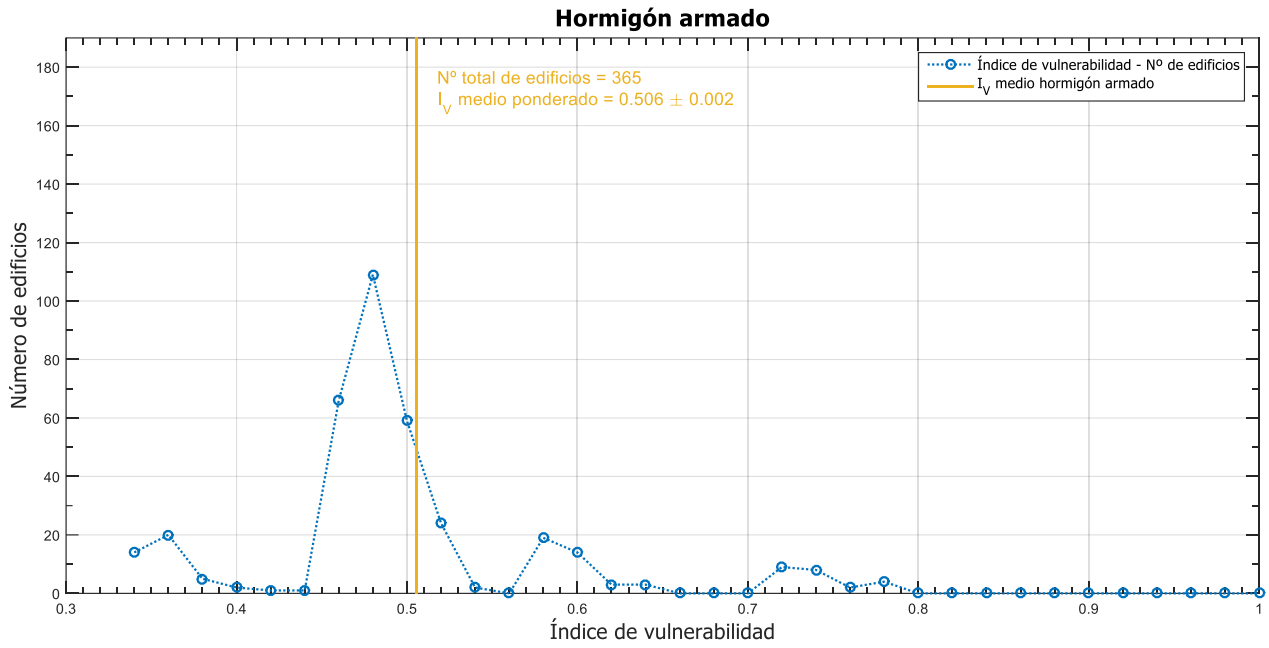


Figura 66. Número de edificios de hormigón armado para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.

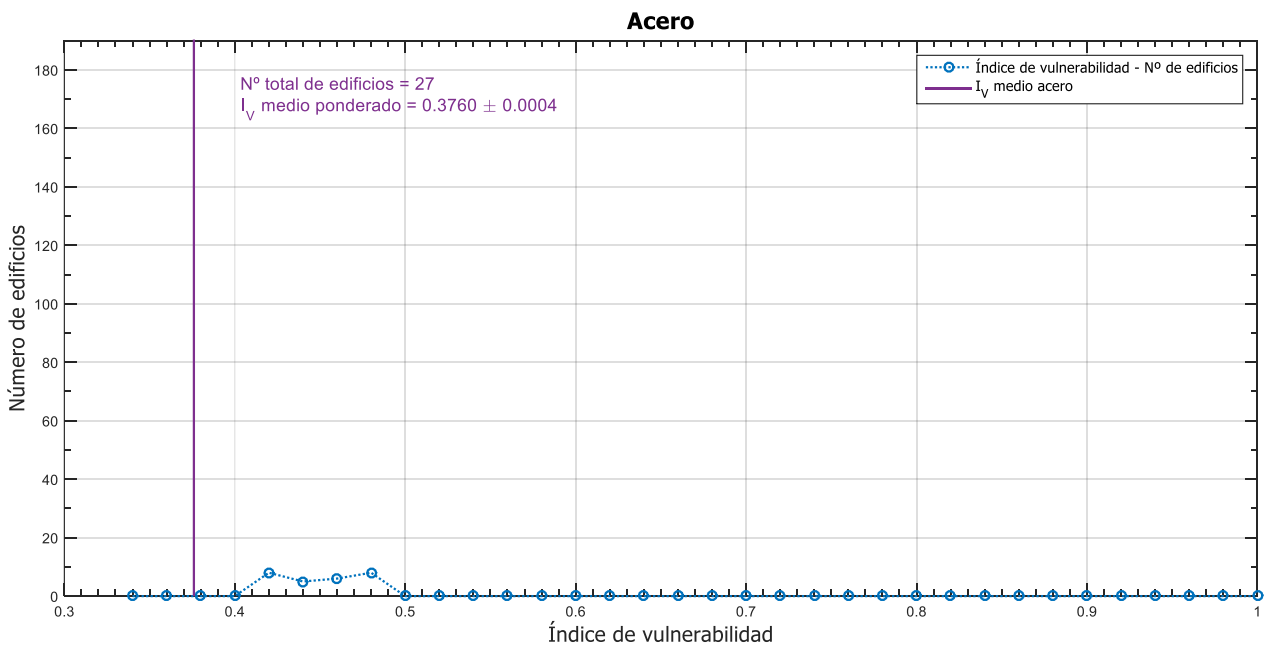


Figura 67. Número de edificios de acero para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.

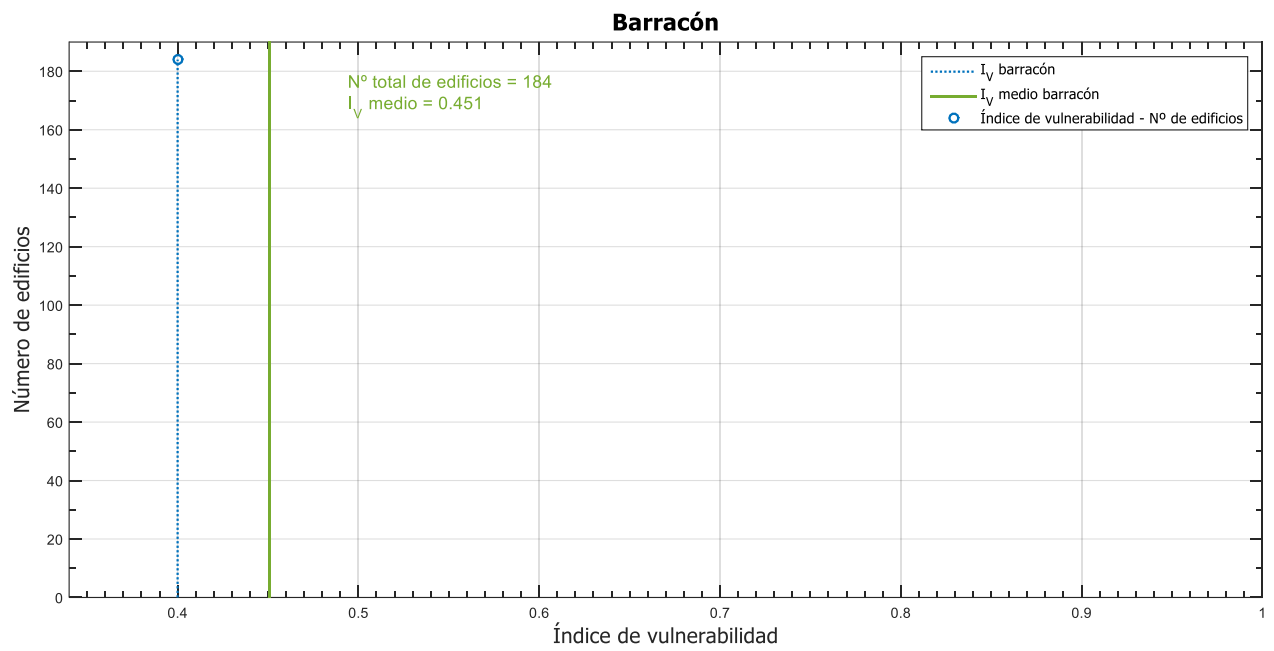


Figura 68. Número de barracones para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.

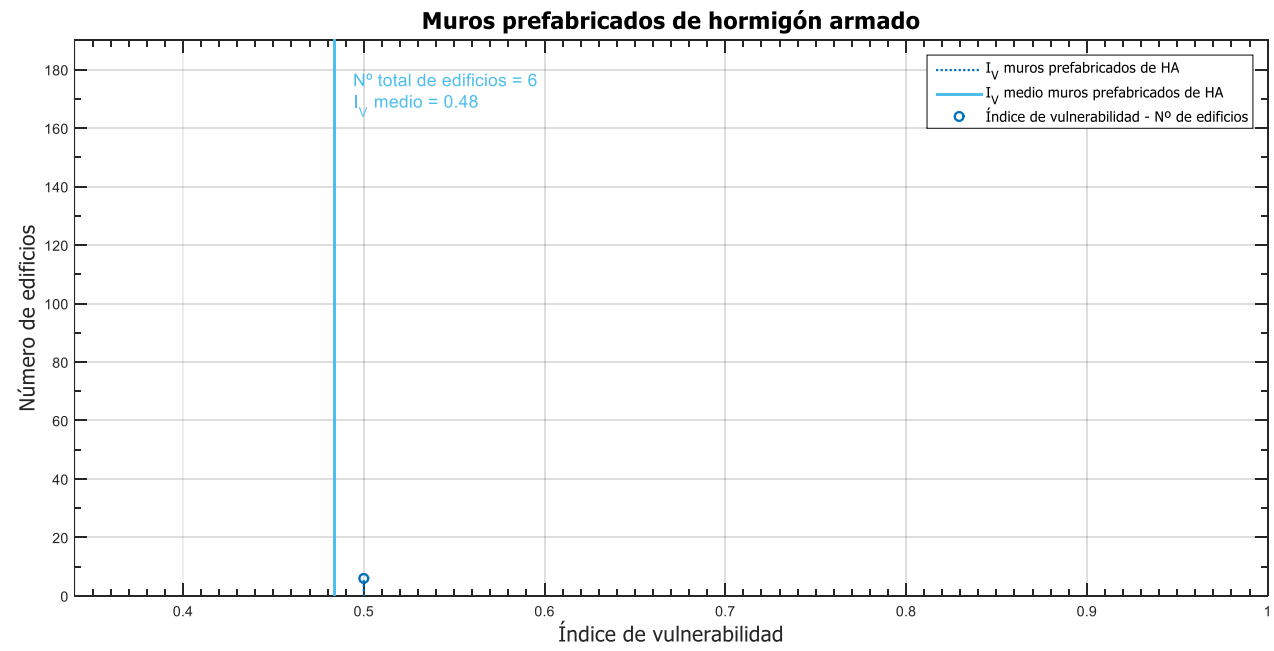


Figura 69. Número de edificios de muros prefabricados de hormigón armado para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.

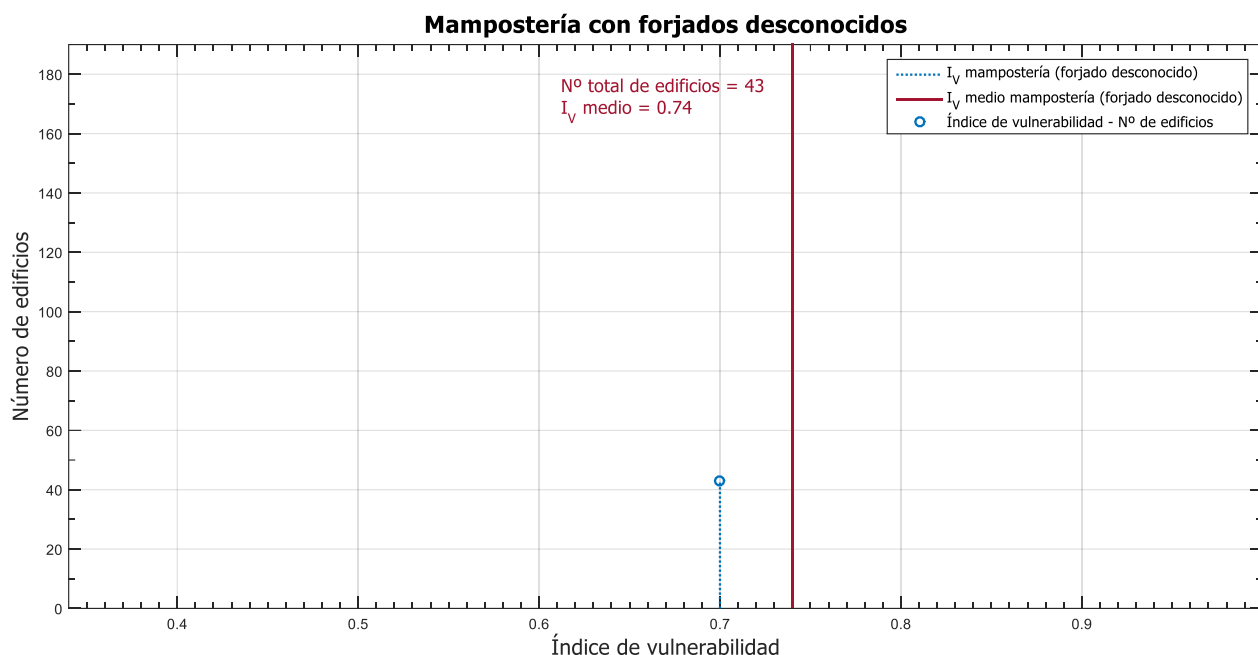


Figura 70. Número de edificios de mampostería con forjado desconocido para un determinado valor del índice de vulnerabilidad.

DAÑO ESPERADO EN LOS EDIFICIOS

Los resultados de daño se analizan para intensidades VI, VII y VIII, cuyos periodos de retorno en *Girona* respectivamente son 100, 475 y 3333 años. Para el percentil 50 y teniendo en cuenta los siguientes rangos para los estados de daño:

- $0.0 \leq I_d < 0.5 \rightarrow$ estado de daño nulo.
- $0.5 \leq I_d < 1.5 \rightarrow$ estado de daño leve.
- $1.5 \leq I_d < 2.5 \rightarrow$ estado de daño moderado.
- $2.5 \leq I_d < 3.5 \rightarrow$ estado de daño severo.
- $3.5 \leq I_d < 4.5 \rightarrow$ estado de daño muy severo.
- $4.5 \leq I_d \leq 5.0 \rightarrow$ estado de daño completo.

En el escenario de intensidad VI el edificio de mampostería (tipología estándar) presenta un estado de daño leve, y tanto el de hormigón armado, el de acero, el barracón, el de muros prefabricados y el de mampostería con forjado desconocido presentan un estado de daño nulo. Para intensidad VII el edificio de mampostería (tipología estándar) presenta un estado de daño moderado y el de mampostería con forjados desconocidos leve. Por el contrario, el edificio de hormigón armado, el de acero, el barracón y el de

muros prefabricados presentan un estado de daño nulo. Para intensidad VIII el edificio de mampostería (tipología estándar) presenta un estado de daño severo y el de mampostería con forjado desconocido un estado de daño moderado. El edificio de hormigón armado, el de acero y el de muros prefabricados un estado de daño leve. Y por último, el barracón presenta un estado de daño nulo

Considerar el percentil 50 significa que, para un edificio específico, tras la ocurrencia de 100 terremotos, 50 terremotos generarán el estado de daño mencionado o uno superior y 50 un estado de daño inferior al mencionado o, equivalentemente que, para un terremoto dado, la mitad de los edificios sufrirían un estado de daño mayor o igual al obtenido.

DAÑO ESPERADO EN LAS ESCUELAS DE LA COMARCA DEL *ALT EMPORDÀ*

En los escenarios de la comarca del *Alt Empordà* se observa que la mayor concentración de escuelas se localiza geográficamente en la zona centro de dicha comarca. En concreto, en el municipio de *Figueres* (22 % de las 72 escuelas de la comarca). Este municipio tiene asociada una intensidad VII para un período de retorno de 475 años. Si se observan los resultados obtenidos para el escenario de intensidad VII y el percentil 50, puede contemplarse que la mayoría de las escuelas del municipio (75 % de las 16 escuelas del municipio) tienen asociado un estado de daño nulo (Figura 46). Las escuelas que tienen asociado un estado de daño leve y moderado no se encuentran concentradas en el municipio sino dispersas en otros pequeños municipios de la comarca.

Al analizar los resultados para el percentil 95 en *Figueres* o solo se localiza una escuela con estado de daño muy severo asociado. Pero repartidas por el territorio de la comarca existen cinco escuelas más que tienen este estado de daño asociado.

DAÑO ESPERADO EN LAS ESCUELAS DE LA COMARCA DEL *GIRONÈS*

En la comarca del *Gironès* hay 74 escuelas. La mayoría de ellas se localizan en el municipio de *Girona*, un total de 37 escuelas (50 % de las escuelas de la comarca). Este municipio tiene asociada una intensidad VII para un período de retorno de 475 años. Si se observan los resultados obtenidos para el escenario de intensidad VII y el percentil 50, puede contemplarse que la mayoría de las escuelas (65 % de las 37 escuelas del municipio) tienen asociado un estado de daño nulo (Figura 53).

Para el escenario de intensidad VII y percentil 50, en toda la comarca, hay seis escuelas que tienen el estado de daño moderado asociado. Al analizar los resultados para el percentil 95 se localizan diez escuelas con un estado de daño muy severo asociado.

DAÑO ESPERADO EN LAS ESCUELAS DE LA PROVINCIA DE *GIRONA*

A nivel provincial (295 escuelas) para el escenario de intensidad VI (percentil 50) se obtienen resultados de daño nulo para el 73.3 % de las escuelas y leve para el 25.5 %. Únicamente una escuela de la comarca de la Selva, tiene asociado un estado de daño moderado. Se trata de la *Escola Sant Salvador D'Horta*, ubicada en el municipio de *Santa Coloma de Farners*, construida en 1918 y destinada a la enseñanza de educación infantil y primaria. La escuela está compuesta por un único edificio de muros de carga de mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería (tipología M 3.2) y tres plantas.

Para intensidad VII se estima un daño entre nulo (58.3 % de las escuelas) y moderado (9.8 % de las escuelas). Pero nuevamente la *Escola Sant Salvador D'Horta* presenta mayor estado de daño, en este caso severo.

Para intensidad VIII un 9.2 % de las escuelas presentan un estado de daño severo, la *Escola Sant Salvador D'Horta* presenta un estado de daño muy severo y el resto de escuelas presentan un estado de daño entre nulo, leve y moderado, con mayor presencia del estado leve (58.6 % de las escuelas).

En la Figura 71 se muestran los valores del índice de daño medio que se han obtenido para intensidad VII (percentil 50) para todas las escuelas de *Girona*. Además, se representan, mediante líneas horizontales, los límites superiores de los cuatro estados de daño que se dan en *Girona*: nulo, leve, moderado y severo.

La comarca del *Alt Empordà* tiene un total de 72 escuelas, de las cuales el 54 % tiene asociado un estado de daño nulo y un 13% estado moderado. La comarca del *Baix Empordà* tiene un total de 46 escuelas y el 59 % tiene asociado un estado de daño nulo. La comarca de la *Garrotxa* tiene un total de 22 escuelas, el 41 % de las mismas tiene asociado un estado de daño nulo y un 14 % tiene asociado un estado de daño moderado. La comarca del *Gironès* tiene un total de 74 escuelas y el 64 % tiene asociado un estado de daño nulo. La comarca de *Pla de Estany* tiene un total de 16 escuelas y el 38 % tiene asociado un estado de daño nulo. La comarca del *Ripollès* se compone de 15 escuelas y el 33 % de las mismas tiene asociado un estado de daño nulo y un 20 % tienen asociado

un estado de daño moderado. Por último, la comarca de la *Selva* tiene 50 escuelas de las cuales un 78 % tienen asociado un estado de daño nulo. Todo ello también para el escenario de intensidad VII para un período de retorno de 475 años (percentil 50).

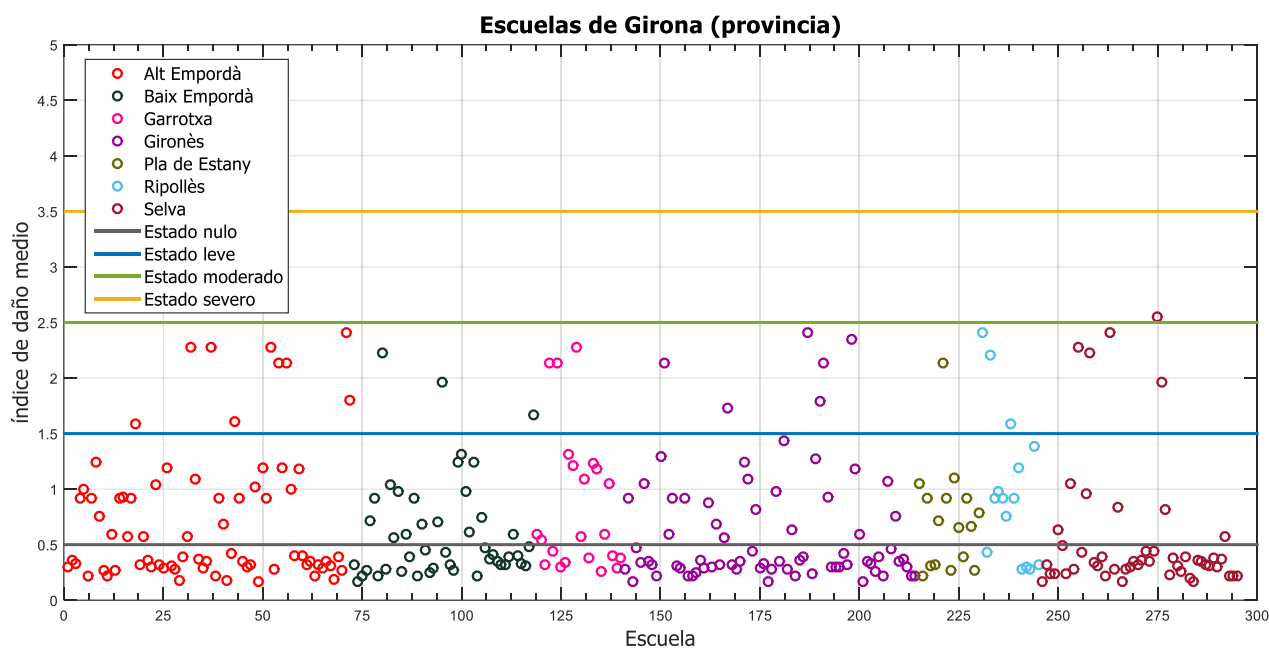


Figura 71. Índices de daño medio para todas las escuelas de la provincia de Girona para una intensidad VII para el percentil 50 y la curva mejor de vulnerabilidad (período de retorno de 475 años).

En las tablas del Anexo A (A3) se incluye el valor del índice de daño medio esperado para todas las escuelas de *Girona* según el escenario de intensidad VII para un período de retorno de 475 años y el percentil 50.

CAPITULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. DISCUSIÓN

5.1.1. ENFOQUE PROBABILISTA

El estudio desarrollado tiene asociadas incertidumbres debidas básicamente a tres factores: 1) la peligrosidad sísmica de *Girona* es moderada, se dan largos períodos de recurrencia de fenómenos sísmicos; 2) la información sobre las características estructurales de los edificios es incompleta; y 3) se han debido tener en cuenta algunas consideraciones para poder aplicar el programa USERISK a un sitio distinto para el cual fue desarrollado y para tipologías no estándar del proyecto Risk-UE. Por lo tanto, el daño sísmico se ha estimado considerando estas incertidumbres. Para asociar las incertidumbres a los resultados se ha llevado a cabo el estudio de forma probabilista y se ha aplicado de forma individualizada para cada uno de los edificios que componen la base de datos disponible.

A pesar de las incertidumbres, el método aplicado proporciona resultados razonables y acordes con las características propias de las estructuras y su localización. Es un método adecuado para aplicarse en áreas urbanas con gran cantidad de elementos expuestos. Pero a la hora de interpretar los resultados siempre debe hacerse también desde un punto de vista probabilista.

Los resultados del índice de daño medio se proporcionan para los percentiles 5, 50 y 95, lo que permite hacerse una idea de la dispersión de los resultados obtenidos. Además, es importante conocer, a efectos de toma de decisiones, que, por ejemplo, para el percentil 95, hay un 5% de los edificios con daño mayor al calculado para este percentil.

5.1.2. PROGRAMA USERISK

Para obtener los parámetros de forma (alfa y beta) de las funciones de vulnerabilidad de cada uno de los edificios, que componen la actual base de datos, se ha empleado el programa USERISK 2011. Es un programa que permite estimar la vulnerabilidad y el daño sísmico de edificios de zonas urbanas de manera probabilista. En cuanto a los resultados de vulnerabilidad se muestran en forma de gráficas y además se proporcionan ficheros con los valores numéricos de los parámetros de forma, el valor medio del índice

de vulnerabilidad y su desviación estándar para las tres curvas (inferior, mejor y superior) de cada edificio. A partir de estos valores ha sido posible realizar el análisis de vulnerabilidad y daño de los edificios de las escuelas de *Girona*.

Como se ha explicado en la introducción, se trata de un programa que requiere información variada sobre los elementos a analizar, tanto sobre sus características geométricas, estructurales y de localización, como sobre el área geográfica de estudio (tipos de suelo y peligrosidad sísmica). Compilar toda la información necesaria ha sido la tarea que ha planteado mayor dificultad del presente TFM. Pues la estimación del daño sísmico se ha llevado a cabo para un área geográfica distinta para la cual el programa fue desarrollado y se han debido considerar tipologías que dicho programa no considera (tipologías no estándar).

Por lo tanto, se puede concluir que en el presente TFM, además de proporcionar la estimación del daño sísmico de las escuelas de *Girona*, se ha creado también una metodología que permite adaptar la información de cualquier área geográfica y de diversas tipologías estructurales a los requerimientos del programa USERISK.

5.1.3. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El análisis de daño sísmico georreferenciado se ha llevado a cabo mediante el empleo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el programa ArcGIS. El objetivo principal del empleo de esta herramienta ha sido la obtención de mapas de riesgo de las escuelas de *Girona* (representación georreferenciada de los daños físicos directos esperados para cada escuela). El uso masivo de esta herramienta ha sido muy útil a la hora de representar y extraer información múltiple sobre los elementos de análisis. Ha sido posible generar diversos escenarios para localizaciones y escalas múltiples pues permite una actualización de los mismos de forma relativamente sencilla.

5.2. CONCLUSIONES

5.2.1. EL MÉTODO

En el presente TFM, la estimación de la vulnerabilidad y el daño de los edificios se han llevado a cabo sin considerar ni la ocupación de los mismos, ni el uso específico del edificio (almacén, gimnasio, aulario, etc.). Debido a que el 69.8 % de las escuelas están compuestas por más de un edificio sería conveniente conocer el uso y la ocupación del edificio para así ponderar los resultados de vulnerabilidad y daño. Llevar a cabo el análisis considerando estos factores implica el estudio detallado de los 774 edificios que actualmente componen la base de datos, o, en su caso, segregar edificios cuyo uso no sea específicamente escolar, por no albergar estudiantes durante los períodos y horarios escolares (por ejemplo, almacenes).

5.2.2. CONCLUSIONES SOBRE LA VULNERABILIDAD

En cuanto a la vulnerabilidad de los edificios que se han utilizado como ejemplo (tipologías estándar) se observa que el edificio que presenta una mayor vulnerabilidad (curva mejor) es el de mampostería. Por el contrario, el edificio que tiene asociada una menor vulnerabilidad es el de hormigón armado.

El índice de vulnerabilidad básico para la tipología estructural del edificio de hormigón armado es superior al índice básico de la tipología del edificio de acero. Pero tras el análisis de vulnerabilidad incorporando los modificadores pertinentes, el edificio de hormigón armado tiene asociado un índice de vulnerabilidad inferior al que tiene asociado el de acero. Este fenómeno se debe a que las características de geometría (Figura 29) y localización del edificio de acero penalizan, de forma significativa, su vulnerabilidad.

En relación a los resultados obtenidos sobre la vulnerabilidad a nivel global (774 edificios) puede concluirse que las tipologías más vulnerables son mampostería y muros prefabricados de hormigón armado. Por el contrario, las tipologías menos vulnerables son los barracones y los edificios de hormigón armado.

5.2.3. CONCLUSIONES SOBRE EL DAÑO SÍSMICO

Tras analizar los resultados de daño por comarcas se concluye que la comarca del *Ripollès* es la que tiene mayor porcentaje de escuelas con probabilidades de sufrir daño moderado. La comarca de la *Selva* es la única que tiene un porcentaje significativo de escuelas con una probabilidad considerable de sufrir daño severo.

Para el escenario de intensidad VII (período de retorno de 475 años) y el percentil 50 se muestran en las siguientes tablas las escuelas, por comarcas, con probabilidades de sufrir daño moderado o severo. En la Tabla 30 se muestran las escuelas para la comarca del *Alt Empordà*, en la Tabla 31 para las escuelas del *Baix Empordà*, en la Tabla 32 para las escuelas de la *Garrotxa*, en la Tabla 33 para las escuelas del *Gironés*, en la Tabla 34 para las escuelas de *Pla d'Estany*, en la Tabla 35 para el *Ripollès* y, por último, en la Tabla 36 para las escuelas de la comarca de la *Selva*.

Tabla 30. Escuelas de la comarca del *Alt Empordà* con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.

Nombre de la escuela	Número de edificios	Índice de daño medio	Estado de daño esperado	Municipio	Nº de habitantes del municipio (IDESCAT, 2015)	Comarca
ESCOLA GONÇAL COMELLAS - ZER LA GARRIGA	2	1.5876	Moderado	Avinyonet de Puigventòs	1565	Alt Empordà
ESCOLA LLAGUT	1	2.273	Moderado	Sant Pere Pescador	2143	Alt Empordà
ESCOLA MONT-ROIG - ZER REQUESENS	1	2.273	Moderado	Darnius	554	Alt Empordà
ESCOLA PUIG D'ESQUERS - ZER CAP DE CREUS	1	1.6071	Moderado	Colera	533	Alt Empordà
ESCOLA SANTA CECÍLIA - ZER LES SALINES	1	2.273	Moderado	Boadella i les Escaules	261	Alt Empordà
ESCOLA TERESA PALLEJÀ	1	2.1391	Moderado	Fortià	723	Alt Empordà
ESCOLA TRAMUNTANA - ZER EMPORDÀ	1	2.1391	Moderado	Pont de Molins	512	Alt Empordà
INSTITUT RAMON MUNTANER	1	2.4097	Moderado	Figueres	45346	Alt Empordà
LA SALLE DE FIGUERES	2	1.8017	Moderado	Figueres	45346	Alt Empordà

Tabla 31. Escuelas de la comarca del *Baix Empordà* con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.

Nombre de la escuela	Número de edificios	Índice de daño medio	Estado de daño esperado	Municipio	Nº de habitantes del municipio (IDESCAT, 2015)	Comarca
ESCOLA GAZIEL	3	2.22836667	Moderado	Sant Feliu de Guíxols	21586	Baix Empordà
ESCOLA PEDRA BLANCA - ZER EMPORDANET - GAVARRES	1	1.963	Moderado	La Pera	441	Baix Empordà
LA SALLE DE PALAMÓS	3	1.6671	Moderado	Palamós	17911	Baix Empordà

Tabla 32. Escuela de la *Garrotxa* con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.

Nombre de la escuela	Número de edificios	Índice de daño medio	Estado de daño esperado	Municipio	Nº de habitantes del municipio (IDESCAT, 2015)	Comarca
ESCOLA FINESTRES - ZER ELS VOLCANS	1	2.1391	Moderado	Mieres	330	Garrotxa
ESCOLA JOAN ROURA I PARELLA - ZER EL LLIERCA	2	2.1391	Moderado	Tortellà	775	Garrotxa
ESCOLA MONTPALAU - ZER LLIERCA	1	2.273	Moderado	Argelaguer	412	Garrotxa

Tabla 33. Escuela del *Gironès* con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.

Nombre de la escuela	Número de edificios	Índice de daño medio	Estado de daño esperado	Municipio	Nº de habitantes del municipio (IDESCAT, 2015)	Comarca
ESCOLA DE BORDILS	1	2.1391	Moderado	Bordils	1710	Gironès
ESCOLA LACUSTÀRIA	1	1.7291	Moderado	Llagostera	8224	Gironès
ESCOLA PUIG D'ARQUES	1	2.4097	Moderado	Cassà de la Selva	10030	Gironès
ESCOLA SAGRAT COR DE JESÚS	2	1.7884	Moderado	Girona	97587	Gironès
ESCOLA SANT JORDI - ZER BAIX TER	1	2.1391	Moderado	Sant Jordi Desvalls	720	Gironès
ESCOLA VERD	2	2.3433	Moderado	Girona	97587	Gironès

Tabla 34. Escuela de *Pla d'Estany* con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.

Nombre de la escuela	Número de edificios	Índice de daño medio	Estado de daño esperado	Municipio	Nº de habitantes del municipio (IDESCAT, 2015)	Comarca
ESCOLA DE SANT ESTEVE DE GUIALBES	2	2.1391	Moderado	Vilademuls	834	Pla de l'Estany

Tabla 35. Escuela del *Ripollès* con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.

Nombre de la escuela	Número de edificios	Índice de daño medio	Estado de daño esperado	Municipio	Nº de habitantes del municipio (IDESCAT, 2015)	Comarca
ESCOLA DOCTOR ROBERT	2	2.41175	Moderado	Camprodon	2299	Ripollès
ESCOLA JOAN MARAGALL	2	2.20605	Moderado	Ripoll	10632	Ripollès
ESCOLA NÚRIA MORER I PI - ZER COMTE ARNAU	1	1.5876	Moderado	Planoles	298	Ripollès

Tabla 36. Escuela de la *Selva* con probabilidades de sufrir daños esperados significativos.

Nombre de la escuela	Número de edificios	Índice de daño medio	Estado de daño esperado	Municipio	Nº de habitantes del municipio (IDESCAT, 2015)	Comarca
ESCOLA GUILLERIES	2	2.2744	Moderado	Sant Hilari Sacalm	5608	Selva
ESCOLA JOAQUIM RUYRA	3	2.2293	Moderado	Blanes	39132	Selva
ESCOLA LA VALL	1	2.4097	Moderado	Osor	421	Selva
ESCOLA SANT SALVADOR D'HORTA	1	2.5475	Severo	Santa Coloma de Farners	12681	Selva
ESCOLA SANTA MARIA	1	1.963	Moderado	Blanes	39132	Selva

La Figura 71 muestra que hay un total de veintinueve escuelas en la provincia de *Girona* con probabilidades de sufrir estado de daño moderado y una con probabilidades de sufrir estado de daño severo para una intensidad VII (período de retorno de 475 años), para el percentil 50 y la curva mejor de vulnerabilidad. Estos resultados conducen a la necesidad de realizar estudios individualizados de dichas escuelas para valorar opciones de mejora que reduzcan la probabilidad que tienen de sufrir estados de daño que, entre otros, implican la aparición de grietas en las columnas y vigas de la estructura en la base y en las uniones de muros acoplados, torcedura de las varillas de refuerzo y grandes grietas en muros de particiones, comprometiendo la ocupación del edificio y haciendo posible el daño de las personas.

5.3. RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

5.3.1. SOBRE EL MÉTODO Y EL PROGRAMA

Tras la realización del presente TFM se ha podido comprobar que el programa USERISK es útil para la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de multitud de elementos, de un área geográfica, expuestos a un determinado fenómeno sísmico. La interfaz del programa permite llevar a cabo el estudio de forma sencilla y, además, la obtención de las funciones de vulnerabilidad y riesgo sísmico es relativamente rápida.

Sin embargo, es importante mencionar que es un programa enfocado a la estimación de escenarios de vulnerabilidad y riesgo sísmico en Barcelona. No permite introducir efectos de suelo característicos de otro lugar, tampoco considerar tipologías no estándar de la matriz de tipologías BTM de Risk-UE, o variar, según el criterio del usuario, los modificadores por comportamiento y regionales. Sería interesante que el programa permitiese indicar de forma manual todos los parámetros que intervienen en la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico (tipo de suelo sobre el cual se sitúa el edificio, índice de vulnerabilidad básico del mismo, modificadores por comportamiento, etc.). De este modo, el programa permitiría ser aplicado a múltiples áreas geográficas con gran variedad de tipologías estructurales.

Por otro lado, el programa genera las curvas de daño para un edificio según un enfoque determinista. Sería adecuado obtenerla de manera probabilista, indicando así la dispersión de los resultados obtenidos. La ventaja de este enfoque probabilista, es que permite hacer los cálculos para cualquier percentil, de forma que es posible redefinir y analizar los límites de daños aceptables y programar estudios de detalle para los edificios con daños no aceptables o, incluso, programar acciones de intervención para disminuir la vulnerabilidad del edificio, dada la imposibilidad de reducir o modificar la peligrosidad.

5.3.2. SOBRE LOS DATOS Y LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para llevar a cabo la estimación de vulnerabilidad y daño sísmico de la manera más representativa posible, es necesario disponer de multitud de información con respecto a los elementos expuestos. Por ejemplo, es importante conocer el número de estudiantes que pertenecen a una misma escuela para, ante planes de emergencia, destinar a la zona de interés los efectivos que realmente cada escuela necesitaría. Por otro lado, como

se ha mencionado anteriormente, es necesario conocer con detalle la utilidad de cada uno de los edificios que componen una misma escuela para dar mayor importancia a aquellos con mayor ocupación en horario escolar.

Sería recomendable hacer un estudio detallado de las escuelas de la provincia de *Girona* para poder determinar las características de los edificios que componen cada una de las escuelas. Algunas de las características importantes a determinar serían: número de estudiantes, presupuesto escolar, actualización de las inspecciones técnicas, mantenimiento y estado de las instalaciones y funcionalidad de los edificios, entre otros.

5.3.3. SOBRE LA VULNERABILIDAD Y EL DAÑO ESPERADO

Es importante determinar las tipologías estructurales que tienen asociados mayores índices de vulnerabilidad y, también, las características geométricas que penalizan en mayor medida la vulnerabilidad de un edificio. Pues, evitando el empleo de tipologías vulnerables y de diseños geométricos complejos, se podría reducir la vulnerabilidad de los edificios de nueva construcción. Además, sería interesante crear pautas para la adecuada construcción sismorresistente de edificios que formarán parte de una estructura especial, como son las escuelas.

Por último, es importante tener identificadas las escuelas con tendencia a sufrir mayor daño para todas las comarcas de *Girona* permitiría una adecuada gestión de los recursos de emergencias en caso de una catástrofe.

REFERENCIAS

- Aguilar, A. (2011). Evaluación probabilística del daño sísmico de edificios en zonas urbanas. *Tesis Doctoral*. Departamento del Terreno, Cartografía y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- ATC-13 (1985). *Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13*. Applied Technology Council. Redwood City, California. 492 pp.
- Casado, N. (2012). Estudio de vulnerabilidad y daño sísmico de las escuelas de la provincia de Girona. *Trabajo Fin de Grado*. Departamento del Terreno, Cartografía y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Última consulta: junio 2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/21298>.
- Cid, J., Susagna, T., Goula, X., Chavarria, L., Figueras, S., Fleta, J., Casas, A. y Roca, A. (2001). "Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects." *Pure Applied Geophysics* **158**: 2559-2577.
- IDESCAT (2015). *Instituto de Estadística de Cataluña*. Generalitat de Catalunya. Último acceso: junio de 2016. Disponible en: <http://www.idescat.cat/emex/?lang=es>.
- IGME (2009). *WMS del Mapa de litologías de España*. Instituto Geológico y Minero de España. Último acceso: junio de 2016. Disponible en: http://mapas.igme.es/Servicios/#IGME_Litologias_1M
- IGME (2009). *WMS del Mapa de edades de España*. Instituto Geológico y Minero de España. Último acceso: junio de 2016. Disponible en: http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx#IGME_Edades_1M
- Jaramillo, N., Carreño, M. L., Lantada, N. (2016). "Evaluation of social context integrated into the study of seismic risk for urban areas". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, August 2016, vol. **17**: 185-198. DOI: [0.1016/j.ijdrr.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.05.002).
- Lantada, N. (2007). Evaluación del daño sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. *Tesis Doctoral*. Departamento del Terreno, Cartografía y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Última consulta: junio 2016. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6259>.

LOMCE (2013). "Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa". *Jefatura del Estado*. **BOE-A-2013-12886**: 97858 – 97921. Último acceso: mayo 2016. Disponible en:

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-12886.

McGuire, R. K., (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland (California).

Milutinovic Z. V. and G. S. Trendafiloski (2003). "WP4: Vulnerability of current buildings". *Risk-UE project Handbook*. **Risk-UE project report**. 111 pp.

Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B. L., Depinois, S., Masure, P. y Risk-UE team. (2004). "The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake Risk scenarios". *Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering*, Vancouver B.C (Canadá). CD-ROM. **3329**.

NCSE-02 (2002). "Real decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSR-02)". *Ministerio de Fomento*. **BOE: 244-2002**: 35898-35966. Último acceso mayo 2016. Disponibles en: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-19687.

Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda J. (2007). CRISIS2007. Program for Computing Seismic Hazard. *Institute of Engineering UNAM*, Mexico.

Pujades, L. y Barbat, A. (2004). *Metodología de estimación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones clasificadas de "importancia especial" en la NCSE-02*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 222 pp.

Secanell, Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca, A. (2004). "Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties". *Journal of Seismology*. **8**: 25-40.

SISMICAT (2003). Pla especial d'emergències sísmiques a Catalunya. Generalitat de Catalunya, Departament d'Interior, Direcció General de Protecció Civil. 33 pp. Último acceso: mayo 2016. Versión (catalán) revisada en 2014. Disponible en: http://interior.gencat.cat/web/.content/home/030_arees_dactuacio/proteccio_civil

[/plans de proteccio civil/plans de proteccio civil a catalunya/documents/pla si
smicat_document.pdf](#)

Udías, A. (1999). *Principles of Seismology*. Cambridge University Press (Cambridge). 475 pp. ISBN: 521 62434 7.

UNDRO (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator (Boaton). 49 pp.

Utsu, T. (2002). "A List of Deadly Earthquakes in the World: 1500-2000". *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. **81A**: 691-717. DOI: 10.1016/S0074-6142(02)80245-5.

ANEXOS

Los anexos se incluyen como documentos en formato PDF adjuntos.

ANEXO A.

A1. SUPERFICIE DE LAS COMARCAS Y MUNICIPIOS DE *GIRONA*

A2. DETALLES DE VULNERABILIDAD

A3. DETALLES DEL DAÑO ESPERADO